Scientific Excellence • Resource Protection & Conservation • Benefits for Canadians
Excellence scientifique • Protection et conservation des ressources • Bénéfices aux Canadiens

Étude hydro-sédimentologique de la réouverture de la lagune du Havre aux Basques Iles-de-la-Madeleine

Y. Ouellet, Y. Ropars et Y. Vigneault

Ministère des Pêches et des Océans
Direction de la Gestion des pêches et de l'habitat
Division de la Gestion de l'habitat du poisson
Gare Maritime Champlain C.P. 15500
901 Cap Diamant Québec. Qué. G1K 7Y7

Octobre 1990

Rapport technique canadian des sciences halieutiques et aquatiques No 1766

Fisheries and Oceans / Pêches et Océans

Canada

Canadian Technical Report of Fisheries and Aquatic Sciences

Technical reports contain scientific and technical information that contributes to existing knowledge but which is not normally appropriate for primary literature. Technical reports are directed primarily toward a worldwide audience and have an international distribution. No restriction is placed on subject matter and the series reflects the broad interests and policies of the Department of Fisheries and Oceans, namely, fisheries and aquatic sciences.

Technical reports may be cited as full publications. The correct citation appears above the abstract of each report. Each report is abstracted in *Aquatic Sciences and Fisheries Abstracts* and indexed in the Department's annual index to scientific and technical publications.

Numbers 1–456 in this series were issued as Technical Reports of the Fisheries Research Board of Canada. Numbers 457–714 were issued as Department of the Environment, Fisheries and Marine Service, Research and Development Directorate Technical Reports. Numbers 715–924 were issued as Department of Fisheries and the Environment, Fisheries and Marine Service Technical Reports. The current series name was changed with report number 925.

Technical reports are produced regionally but are numbered nationally. Requests for individual reports will be filled by the issuing establishment listed on the front cover and title page. Out-of-stock reports will be supplied for a fee by commercial agents.

Rapport technique canadien des sciences halieutiques et aquatiques

Les rapports techniques contiennent des renseignements scientifiques et techniques qui constituent une contribution aux connaissances actuelles, mais qui ne sont pas normalement appropriés pour la publication dans un journal scientifique. Les rapports techniques sont destinés essentiellement à un public international et ils sont distribués à cet échelon. Il n'y a aucune restriction quant au sujet; de fait, la série reflète la vaste gamme des intérêts et des politiques du ministère des Pêches et des Océans, c'est-à-dire les sciences halieutiques et aquatiques.

Les rapports techniques peuvent être cités comme des publications complètes. Le titre exact paraît au-dessus du résumé de chaque rapport. Les rapports techniques sont résumés dans la revue *Résumés des sciences aquatiques et halieutiques*, et ils sont classés dans l'index annual des publications scientifiques et techniques du Ministère.

Les numéros 1 à 456 de cette série ont été publiés à titre de rapports techniques de l'Office des recherches sur les pêcheries du Canada. Les numéros 457 à 714 sont parus à titre de rapports techniques de la Direction générale de la recherche et du développement, Service des pêches et de la mer, ministère de l'Environnement. Les numéros 715 à 924 ont été publiés à titre de rapports techniques du Service des pêches et de la mer, ministère des Pêches et de l'Environnement. Le nom actuel de la série a été établi lors de la parution du numéro 925.

Les rapports techniques sont produits à l'échelon régional, mais numérotés à l'échelon national. Les demandes de rapports seront satisfaites par l'établissement auteur dont le nom figure sur la couverture et la page du titre. Les rapports épuisés seront fournis contre rétribution par des agents commerciaux.

91-04232/

E R R A T U M

Ouellet, Y., Y. Ropars et Y. Vigneault, 1990. Etude hydro-sédimentologique de la réouverture de la lagune du Havre aux Basques, Iles-de-la-Madeleine. Rapp. tech. can. sci. halieut. aquat. 1766: xii + 62 p.

Cher lecteur,

Nous vous prions d'effectuer les corrections suivantes dans ce rapport suite à des erreurs qui se sont glissées lors de l'impression.

Page	Section	Changer	Pour...
ix	Abstract	hydrolic numerical model development	hydrologic hind coasted model design
3	équation #7	$(1 - k^2)^3$	$(1 - k^2)^2$

Nous nous excusons auprès des auteurs pour les inconvénients résultant de cette confusion.

Le personnel de la division de la Gestion de l'habitat du poisson.

Rapport technique canadien des
sciences halieutiques et aquatiques
No 1766

octobre 1990

Étude hydro-sédimentologique de la réouverture de la lagune du Havre aux Basques Iles-de-la-Madeleine

par

Y. Ouellet[1], Y. Ropars[2] et Y. Vigneault

Ministère des Pêches et des Océans
Direction de la Gestion des pêches et de l'habitat
Division de la Gestion de l'habitat du poisson
Gare Maritime Champlain
C.P. 15500
901 Cap Diamant
Québec. Qué.
G1K 7Y7

[1] Département de génie civil, Université Laval
[2] Travaux Publics Canada, Ressources Marines
Gare Maritime Champlain, C.P. 1550
901 Cap Diamant, Québec, Qué. G1K 7Y7

Ministère des Approvisionnements et Services Canada 1990
No de catalogue FS 97-4/1766F ISSN 0706-6570

On devra référer comme suit à cette publication:

Ouellet, Y., Ropars, Y., et Y. Vigneault. 1990. Etude hydro-sédimentologique de la réouverture de la lagune du Havre aux Basques, Iles-de-la-Madeleine. Rapp. tech. can. sci. halieut. aquat. 1766: XII + 62 p.

TABLE DES MATIÈRES

Page

LISTE DES TABLEAUX v

LISTE DES FIGURES vii

LISTE DES SYMBOLES x

RÉSUMÉ xi

ABSTRACT xi

PRÉFACE xii

INTRODUCTION 1

GÉNÉRALITÉS 1

CARACTÉRISTIQUES HYDRAULIQUES DE LA PASSE 3

Équations de base 3
Application à la passe sur la dune de l'est 3
Application à la passe sur la dune de l'ouest 4

STABILITÉ DE LA PASSE SUR LA DUNE DE L'EST 5

Stabilité hydraulique 5
Stabilité sédimentologique 5

VARIATIONS DES NIVEAUX D'EAU 8

Variations des niveaux d'eau avant réouverture 8
Variations des niveaux d'eau après réouverture 9

TAUX DE MÉLANGE 9

CLIMAT DES VAGUES 10

Climat des vagues près de l'ouverture 10
Évaluation de la capacité de transport littoral 11

TABLE DES MATIÈRES (suite)

Page

SOLUTIONS D'AMÉNAGEMENTS 12

Généralités 12
Travaux d'aménagement proposés 13
Dragage du chenal et coût des travaux 13
Éléments à considérer 14

CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS 15

RÉFÉRENCES 16

LISTE DES TABLEAUX

Tableau		Page
1	Calculs hydrauliques de la passe sur la dune de l'Est	24
2	Caractéristiques géométriques de la passe de la dune de l'Ouest	24
3	Caractéristiques hydrauliques de la passe de la dune de l'Ouest	24
4	Valeurs des coefficients a et b de l'équation $A_c = a P_1^b$	28
5	Évaluation de la dérive littorale	31
6	Élévation du niveau de l'eau dans la lagune (18 septembre au 10 octobre 1988)	32
7	Hauteurs et heures mesurées de la marée à Cap-aux-Meules	33
8	Hauteurs et heures prédites de la marée à Cap-aux-Meules (septembre et octobre 1988)	40
9	Hauteurs et heures prédites de la marée à Havre-Aubert (septembre et octobre 1988)	42
10	Statistiques des hauteurs de la marée à Cap-aux-Meules pour l'année 1988 (répartition par classe de 0,1 m)	44
11	Statistiques des hauteurs de la marée à Havre-Aubert pour l'année 1988 (répartition par classe de 0,1 m)	45
12	Fetchs effectifs - Havre aux Basques	52
13	Paramètres et directions des vagues utilisés pour la reconstitution des vagues à partir des données de vent de Cap-aux-Meules	55
14	Climat des vagues au large	56

LISTE DES TABLEAUX (suite)

Tableau		Page
15	Conditions représentatives des vagues près de l'entrée de la lagune	57
16	Climat des vagues près de l'ouverture	58
17	Capacité de transport littoral	59

LISTE DES FIGURES

Figure		Page
1	Cartes des îles-de-la-Madeleine	20
2	Bathymétrie au voisinage de la lagune du Havre aux Basques	21
3	Schéma typique de dépôts de part et d'autre d'une passe	22
4	Classification des formes de passe	22
5	Dynamique des passes aux îles-de-la-Madeleine	23
6	Variation des niveaux d'eau de part et d'autre d'une passe	23
7	Schéma de définition du système étudié	25
8	Variation de la vitesse moyenne maximale en fonction de l'aire mouillée de la passe sur la dune de l'Est	25
9	Relevé bathymétrique de la passe sur la dune de l'Est	26
10	Résultats des mesures courantométriques dans la passe sur la dune de l'Ouest a) Composantes nord et est des courants b) Composantes lissées nord et est des courants c) Représentation polaire des courants	27
11	Dynamique sédimentaire de l'archipel des îles de la Madeleine (Mercier, 1987)	29
12	Évolution générale du transport littoral autour des îles-de-la-Madeleine (Owens, 1976)	30
13	Vagues approchant le littoral des îles-de-la-Madeleine dans la direction est, période 9 secondes (grande échelle)	34

LISTE DES FIGURES (suite)

Figure		Page
14	Vagues approchant le littoral des Iles-de-la-Madeleine dans la direction est, période 9 secondes (petite échelle)	35
15	Courbes de la marée prédite à Cap-aux-Meules (station 1970) a) septembre 1988 et b) octobre 1988	36
16	Courbes de la marée prédite à Havre-Aubert (station 1964) a) septembre 1988 et b) octobre 1988	37
17	Courbes de la marée prédite à L'Étang-du-Nord (station 1990) a) septembre 1988 et b) octobre 1988	38
18	Courbes de la marée prédite à L'Étang-du-Nord (station 1991) a) septembre 1988 et b) octobre 1988	39
19	Courbes de fréquence de dépassement des hauteurs d'eau à Cap-aux-Meules et Havre-Aubert (année 1988)	46
20	Courbes de la marée mesurée à Cap-aux-Meules (du 12 novembre au 10 décembre 1986)	47
21	Courbes de la marée prédite à Cap-aux-Meules (station 1970) a) novembre 1986 et b) décembre 1986	48
22	Courbe de la marée mesurée à L'Étang-du-Nord (du 10 novembre au 10 décembre 1986)	49
23	Courbes de la marée prédite à L'Étang-du-Nord (station 1990) a) novembre 1986 et b) décembre 1986	50
24	Rose des vents à Cap-aux-Meules, Période 1969-1982 (mi-avril à mi-décembre)	51
25	Rose des vagues au large, dans la baie de Plaisance	53
26	Rose des vagues près de l'entrée de la lagune du Havre aux Basques	54

LISTE DES FIGURES (suite)

Figure		Page
27	Relevé bathymétrique de la passe de la lagune datant de 1955	60
28	Localisation et sections types du chenal	61
29	Relevé topographique de la dune de l'Est au niveau de l'ancienne passe	62

LISTE DES SYMBOLES

A_b	=	aire de la lagune (ou de la passe)
A_c	=	aire de la passe (ou du chenal)
a	=	coefficient de la formule de O'Brien
$2a_b$	=	marnage de la marée dans la lagune (baie)
$2a_o$	=	marnage de la marée à l'extérieur de la lagune
b	=	exposant de la formule de O'Brien
B_c	=	largeur de la passe
d_c	=	profondeur d'eau moyenne dans la passe
E	=	volume d'eau qui entre ou sort par la passe par année
F	=	coefficient de frottement global
f	=	coefficient de frottement de Darcy
g	=	accélération de la gravité
K_1	=	coefficient de frottement
K_2	=	coefficient de fréquence
k_{en}	=	coefficient de pertes de charge locales à l'entrée de la passe
k_{ex}	=	coefficient de pertes de charge locales à la sortie de la passe
L_c	=	longueur de la passe
M	=	coefficient adimensionnel
P_t	=	prisme de la marée
Q_g	=	transport littoral global annuel
R	=	rapport des marnages de la marée entre l'extérieur et l'intérieur de la lagune
R_h	=	rayon hydraulique
T	=	période de la marée
T_r	=	temps de renouvellement de l'eau dans la lagune
V	=	volume d'eau dans la lagune à marée basse ou volume des sédiments dans le delta de jusant
V_o	=	vitesse limite d'érosion
V_m	=	vitesse moyenne maximale de l'écoulement dans la passe
ε	=	déphasage de la marée entre l'extérieur et l'intérieur de la lagune
π	=	3,1416
γ	=	masse volumique de l'eau

RÉSUMÉ

Ouellet, Y., Ropars, Y. et Y. Vigneault. 1990. Étude hydro-sédimentologique de la réouverture de la lagune du Havre aux Basques, Iles-de-la-Madeleine. Rapp. tech. can. sci. halieut. aquat. 1766: XII + 62 p.

Ce rapport présente une étude hydro-sédimentologique dans le cadre du projet de la réouverture de la lagune de Havre aux Basques. On y discute principalement des conditions de stabilité de l'ouverture de la passe sous l'influence des principaux paramètres qui entrent en jeu. Ces paramètres sont principalement la marée et le transport littoral des sédiments sous l'action des vagues.

Après une étude des variations des niveaux à l'extérieur et à l'intérieur de la lagune, et ce, avant et après réouverture, une estimation est faite sur le taux de mélange des eaux entre la baie de Plaisance et la lagune du Havre aux Basques, dans ces deux conditions.

Dans le but de servir au dimensionnement des ouvrages et à évaluer la capacité de transport littoral, le climat des vagues a été reconstitué à l'aide d'un modèle numérique faisant appel aux données de vent de la station de Cap-aux-Meules. Par la suite, des solutions d'aménagement sont proposées sur la base des données disponibles présentement. Enfin des recommandations sont faites en ce qui concerne la suite de ce projet.

ABSTRACT

Ouellet, Y., Ropars, Y. et Y. Vigneault. 1990. Étude hydro-sédimentologique de la réouverture de la lagune du Havre aux Basques, Iles-de-la-Madeleine. Rapp. tech. can. sci. halieut. aquat. 1766: XII + 62 p.

This report presents a hydrology and sediment transport study included in the project to open the Havre aux Basques lagoon. Mainly discussed are the stability conditions in opening the pass under the influence of the main parameters that come into play. These parameters are mainly tide and coastal transport of sediments by wave action.

After a study of variations in the levels outside and inside the lagoon, before and after reopening, an estimate is made of the rate of water mixing between the Baie de Plaisance and the Havre aux Basques lagoon under these two conditions.

To determine the size of the structures and to evaluate the coastal transport capacity, the wave climate has been reconstituted from a digital model making use of the wind data from the Cap-aux-Meules station. Subsequently, development solutions are proposed on the basis of the data now available. Finally, recommendations are made concerning follow-up to this project.

PRÉFACE

Cette étude a été réalisée dans le cadre d'une étude plus générale sur l'écologie de la lagune du Havre aux Basques sous l'égide du groupe LAPEL. A cet effet, une campagne de mesures a été réalisée à l'automne 1988, auquelle a participé une équipe de recherche de l'INRS-Océanologie pour les mesures courantométriques dans la passe sur la dune de l'Ouest. L'analyse des résultats et l'interprétation de ceux-ci ont été réalisées en collaboration avec le Département de génie civil de l'Université Laval. La section du présent rapport concernant les travaux d'aménagement proposés a été effectuée en majeure partie par Travaux publics Canada.

INTRODUCTION

La Division de la Gestion de l'habitat du poisson du ministère des Pêches et des Océans étudie présentement la problématique associée à la réouverture de la lagune du Havre aux Basques aux Iles-de-la-Madeleine (fig. 1). Cette lagune est fermée depuis 1957 par la construction sur la dune de l'Est de la route provinciale rejoignant l'Île du Cap aux Meules à l'Île du Havre Aubert. Une étude de faisabilité de la réouverture a été menée par les Consultants SOGEAM en 1985. Une analyse des données de niveau d'eau a été réalisée en 1986 par les Consultants Saint-Laurent (1987). Une étude d'impact socio économique a été réalisée par la firme Barker, De Blois et Associés inc. (1987), tandis que la mise en valeur des ressources fauniques a été étudiée par le groupe Dimension Environnement Ltée (1987).

De ces études, il ressort que le projet est faisable et que c'est la passe principale sur la dune de l'Est, reliant jadis la lagune à la baie de Plaisance, qui serait la plus indiquée pour une réouverture éventuelle. Cette ouverture est montrée sur la figure 2 tirée de la carte marine no 4451 (source: Pêches et Océans, service hydrographique), dont le relevé est antérieur à la fermeture de la lagune. Avant d'entreprendre cette réouverture, il a été recommandé d'entreprendre certaines études, dont fait partie la présente qui touche spécialement les aspects hydraulique et sédimentologique reliés aux caractéristiques de la passe proposée pour rétablir la communication entre la lagune et la baie de Plaisance.

Après une revue des mécanismes qui influencent la stabilité de la passe d'entrée des lagunes, on présentera le fonctionnement de la passe. On décrit ensuite des caractéristiques hydrauliques de la lagune du Havre aux Basques à partir d'un modèle hydraulique simplifié d'un système passe-lagune. En plus des vitesses d'écoulement dans la passe, ce modèle permet d'évaluer les volumes d'échange d'eau entre la baie de Plaisance et la lagune en fonction des caractéristiques géométriques de la passe. Le concept de la section critique, basée sur la vitesse de l'écoulement, est utilisé pour évaluer la section stable de la passe. Le prisme de la marée résultant permet d'estimer le taux de mélange entre les eaux de la baie de Plaisance et de la lagune du Havre aux Basques.

La stabilité de la passe dépend aussi de la dérive littorale des sédiments transitant devant l'entrée de la lagune. Ce paramètre est examiné en fonction du prisme de la marée et des caractéristiques géométriques de la passe.

Enfin des solutions d'aménagement sont proposées pour procurer à l'ouverture une certaine stabilité. Ces travaux, qui sont principalement de types dragage, jetées et dérive artificielle des sédiments («by-pass»), sont basés sur le principe d'équilibre entre les forces en jeu, les unes cherchant à fermer la passe et les autres à la maintenir ouverte.

GÉNÉRALITÉS

Etant donné la présence de plusieurs lagunes dans le monde et de leur utilisation principalement pour des fins écologiques et de navigation, les lagunes ont fait l'objet de plusieurs études. La majorité des travaux concerne la stabilité de la passe d'entrée de la lagune (Bruun, 1978). Aux Etats-Unis, un programme de recherche sur les passes des lagunes a été mené depuis plus d'une trentaine d'années par le corps des ingénieurs de l'armée américaine, d'abord sous l'égide du «Committee on Tidal Hydraulics» et depuis les années 1970 par le programme de recherche désigné «General Investigation of Tidal Inlets». Ces documents s'avèrent d'une grande utilité pour obtenir des renseignements sur le sujet. Bien qu'il existe des principes généraux, chaque lagune doit être traitée comme un cas particulier. Ceci provient du fait que l'équilibre dynamique d'un système lagunaire résulte de l'action combinée d'une grande variété de paramètres. L'évaluation de la stabilité des ouvertures sur un littoral soumis à un transport de sédiments doit être étudiée à partir d'une connaissance approfondie des mouvements liquides et solides sous l'action combinée de la marée et des vagues.

Une lagune, telle que définie par Larras (1964), c'est, le long d'une côte très plate, un plan d'eau peu profond - d'un contour incertain - qui se trouve séparé du large par un cordon de sable percé d'un plus ou moins grand nombre d'ouvertures. On appelle aussi ces ouvertures ou entrées: passe, émissaire, débouché, coupure, grau ou port en français. Dans la littérature anglo-saxonne, elles sont connues sous le nom de «inlet». Pour ce qui est des cordons de sable, on les retrouve aussi en

français sous le vocable de flèche, langue ou cordon. Les termes anglosaxons correspondants sont: 'bar' 'spit', 'barrier beach', 'arrow' (British usage). Lorsque le cordon littoral rejoint une île et la terre ferme ou bien deux îles entre elles, celui-ci prend alors le nom d'un tombolo. On les retrouve surtout en bordure des côtes sédimentaires de formation récente.

Le contour, les profondeurs et l'existence même de la lagune, toujours selon Larras (1964), dépendent étroitement de l'équilibre précaire que la nature (ou que l'homme, derrière elle) parvient à maintenir entre les différentes catégories d'actions qui portent, les unes au creusement, les autres au remblaiement de la cuvette et du cordon. Ces facteurs sont principalement l'écoulement causé par la marée, l'action des vagues et les transports littoraux. Larras en conclut donc que la création et le maintien d'un port dans une lagune, ou même d'un simple passage à la mer, constituent une recherche d'équilibre délicate (d'autant plus qu'il faut pouvoir apprécier correctement l'action future de toutes les modifications des éléments en cause) et que l'on ne doit aborder par la suite ce genre de problème qu'avec le maximum d'informations locales précises.

L'eau qui sort par la passe dans une direction transversale à la côte dévie les sables de leur mouvement général de propagation parallèlement à celle-ci sous l'influence de la houle. Les sables déviés continuent alors leur périple le long de la côte sous forme d'une barre de sable de forme plus ou moins arquée devant l'entrée de la lagune. Ceci résulte en la présence d'un haut-fond le plus souvent gênant pour la navigation. Une partie du sable qui arrive devant l'entrée est transportée par le courant de flot pour se déposer dans la lagune contribuant à la formation d'un haut-fond. Le courant de jusant ramène une partie de ces sédiments à l'extérieur de la lagune pour contribuer à la formation de hauts-fonds et d'une barre extérieure. Un schéma typique d'une telle formation est montré sur la figure 3. En période pré-fermeture de la passe de la lagune du Havre présentes (SOGEAM, 1985). Les photographies aériennes de 1979, soit douze ans après la fermeture de la lagune, montrent que les dépôts extérieurs ont disparu et que le littoral s'est uniformisé. A l'intérieur de la lagune, le banc de sable a été étalé sous l'action des vagues, mais les chenaux y sont encore présents. Il est intéressant de noter que, six ans après sa fermeture, la forme deltaïque à l'extérieur de la lagune s'était étalée et avait été déportée quelque peu vers le nord, ce qui laisse croire à une dérive nette des sédiments dans cette direction.

La géométrie d'une passe dépend principalement des courants de marée, du transport littoral des sédiments et de l'action des vagues. Selon Galvin (1971), la configuration des passes est classifiée selon l'une ou l'autre des formes montrées sur la figure 4. La forme 1 existe lorsqu'il y a une forte dominance du transport des sédiments dans une direction. Lorsque le transport des sédiments dans l'autre direction n'est plus négligeable, la passe prend l'une ou l'autre des formes 2. La forme 3 appartient au cas où le transport des sédiments dans l'une ou l'autre direction est à peu près égal. La passe de la lagune du Havre aux Basques, lorsqu'elle était ouverte, semblait correspondre à un cas intermédiaire entre la forme 2 et la forme 3.

Les ouvertures qui donnent accès aux trois lagunes des Iles-de-la-Madeleine ont été instables au fil des ans, comme le montre la figure 5 donnant leur position et leur état au cours des deux derniers siècles (Paul, 1974; Owens et McCann, 1980; Mercier, 1987). Seules les passes du côté est des lagunes de la Grande Entrée et du Havre aux Maisons seraient restées ouvertes durant cette période. La passe principale du côté est de la lagune du Havre aux Basques est celle qui apparaît comme ayant été la plus stable de cette lagune. Comme nous le verrons plus loin, la présence d'ouvertures plus stables du côté est résulte du fait que cette côte est moins exposée aux tempêtes que la côte ouest et que les marées sont de type plutôt semidiurne du côté est et plutôt diurne du côté ouest.

Il n'y a pas eu, à notre connaissance, d'études réalisées sur les conditions de stabilité hydraulique et sédimentologique de la passe de la lagune du Havre aux Basques. La passe de la lagune de la Grande Entrée a été celle qui a été la plus étudiée sous ces aspects jusqu'à présent, dans le cadre des aménagements construits dans la lagune pour les fins d'exploitation de la mine de sel à Grosse-Ile (Ouellet, 1979; Drapeau, 1988).

CARACTÉRISTIQUES HYDRAULIQUES DE LA PASSE

ÉQUATIONS DE BASE

Les courants à travers une passe résultent de l'écoulement dû à la marée. La variation du niveau d'eau dans la lagune suit la variation du niveau à l'extérieur de celle-ci (fig. 6). A chaque instant, l'écoulement dans la passe dépend principalement de la différence de niveau entre la lagune et la mer. Pour une lagune de petite dimension comme celle du Havre aux Basques (le temps de propagation de la marée entre l'entrée et le point le plus éloigné de la lagune étant de l'ordre de 15 min), on peut faire appel à un modèle simplifié décrivant l'écoulement de l'eau dans ce système schématisé à la figure 7. Plusieurs auteurs ont résolu ce système en utilisant une approche analytique. Cette méthode est décrite en détail dans le chapitre 3 du livre de Bruun (1978). On en retrouve également une description par Sorensen (1978), qui présente une application en utilisant la méthode de King (1974) et par Escoffier (1977) qui compare les méthodes de Brown (1928) et de Keulegan (1967). Selon les différentes approches, on retrouve des résultats qui sont voisins les uns des autres.

Le présent développement suit essentiellement le même cheminement que celui utilisé par Sorensen (1978), qui est basé sur la méthode de King (1974). En se référant à la liste des symboles présentée au début du texte, la solution du système est fournie par les équations suivantes, dans lesquelles l'indice c se réfère à la passe (ou chenal) et l'indice b à la lagune (ou baie).

1. Aire de la section d'écoulement de la passe:

$$A_c = B_c\, d_c \qquad (1)$$

2. Rayon hydraulique de la section de la passe:

$$R_h = A_c/(B_c + 2d_c) \qquad (2)$$

3. Coefficient global de pertes de charge dans la passe:

$$F = k_{en} + k_{ex} + f L_c/(4R_h) \qquad (3)$$

avec $k_{en} = 0{,}1$, $k_{ex} = 1{,}0$ et $f = 0{,}03$.

4. Coefficient de frottement:

$$K_1 = (a_s A_b F)/(2 L_c A_c) \qquad (4)$$

5. Coefficient de fréquence:

$$K_2 = (2\pi/T)\,((L_c A_b)/(g A_c))^{1/2} \qquad (5)$$

6. Coefficient adimensionnel:

$$M = (16 K_1 K_2^2)/(3\pi) \qquad (6)$$

7. Rapport des marnages entre l'extérieur et l'intérieur de la lagune:

$$R = \sqrt{\frac{\sqrt{[(1-K_2^2)^4 + M^2]} - (1-K_2^2)^3}{M^2/2}} \qquad (7)$$

8. Déphasage de la marée entre l'extérieur et l'intérieur de la lagune:

$$\varepsilon = \arctan\left[\frac{MR}{2(1-K_2^2)}\right] \qquad (8)$$

9. Vitesse moyenne maximale de l'écoulement dans la passe:

$$V_m = \sqrt{\frac{2ga_s \sin\varepsilon}{F}} \qquad (9)$$

10. Marnage de la marée dans la lagune:

$$2a_b = R\,2a_s \qquad (10)$$

11. Prisme de marée dans la lagune:

$$P_t = 2a_b A_b \qquad (11)$$

APPLICATION À LA PASSE SUR LA DUNE DE L'EST

Le modèle numérique précédent a été appliqué à la passe de la dune de l'Est en considérant, après réouverture, les paramètres suivants:

$2a_s$ = 1,04 m, marnage de la marée de vive-eau;

A_b = 12×10^6 m^2, aire de la lagune à marée moyenne;

g = 9,81 m/s^2, accélération de la gravité;

T = 44 700 s, période de la marée semi-diurne;

L_c = 500 m, longueur de la passe;

B_c = 200 m, largeur de la passe

où le marnage de la marée a été tiré des Tables des marées et courants du Canada (Pêches et Océans, 1989) et l'aire de la lagune à partir du relevé bathymétrique de 1988, valeur correspondant au niveau moyen de l'eau. Les valeurs utilisées pour la longueur et la largeur de la passe sont considérées comme des estimations préliminaires.

Les résultats des calculs sont présentés dans le tableau 1 et sur la figure 8. Le tableau 1 donne les valeurs des paramètres fournies par les équations précédentes pour différentes valeurs de la profondeur d'eau moyenne de la passe comprises entre 0,7 et 5,0 m. La figure 8 montre la variation de la vitesse maximale V_m de l'écoulement en fonction de l'aire de la passe correspondant au niveau moyen, où l'on note que cette vitesse passe par un maximum pour une profondeur d'eau de 1,6 m, ce qui correspond dans le cas présent à une section de 320 m^2. Lorsque l'aire de la section est plus grande que cette valeur critique, une diminution de la section entraîne une augmentation de la vitesse moyenne de l'écoulement. Par contre, si l'aire de la section est plus petite que la valeur critique, une diminution de la section entraîne aussi une diminution de la vitesse de l'écoulement. C'est le concept de stabilité d'une passe établie par Escoffier (1977) qui stipule que si la section actuelle est plus grande que la section critique (correspondant à la vitesse maximale de l'écoulement), la passe aura tendance à être stable, sinon elle aura tendance à se fermer.

APPLICATION À LA PASSE DE LA DUNE DE L'OUEST

Durant la campagne de mesures de l'automne 1988, des relevés bathymétriques et courantométriques de la passe de la dune de l'Ouest ont été effectués (fig. 9). A partir du relevé bathymétrique de cette passe, on a tiré les caractéristiques géométriques en six transects, lesquelles sont présentées dans le tableau 2. Les dimensions moyennes de cette passe au moment des mesures sont les suivantes:

1) longueur, L_c = 375 m;
2) largeur, B_c = 50 m;
3) profondeur d'eau, d_c = 0,4 m;
4) aire, A_c = 20 m^2.

A partir de ces données, on a utilisé le modèle mathématique présenté auparavant pour déterminer les caractéristiques hydrauliques de cette passe. Les autres paramètres utilisés sont:

1) 2 a_o = 0,7 m, marnage de la marée à l'Étang-du-Nord;
2) T = 89,400 s, période de la marée diurne à l'Étang-du-Nord;
3) A_b = 18 x 10^6 m^2, aire de la lagune actuelle, c'est-à-dire correspondant à 0,3 m au-dessus du niveau moyen de l'eau.

Les résultats de ces calculs sont rassemblés dans le tableau 3, où l'on donne aussi les valeurs correspondantes pour des profondeurs d'eau de 0,3 et 0,5 m pour obtenir un ordre de grandeur de la sensibilité des résultats.

Sur la base des mesures courantométriques effectuées par l'INRS-Océanologie lors de la campagne de l'automne 1988 et dont les résultats sont présentés sur les figures 10 a, b et c, suivant trois formes différentes, on note que les courants sont orientés suivant un axe nord-ouest et sud-est. Les courants de jusant (sortant) atteignent 0,8 m/s, tandis que ceux de flot (entrant) sont deux fois plus faibles (0,4 m/s). Il sort donc plus d'eau dans la lagune par cette passe qu'il n'en entre. Ce surplus d'eau dans la lagune provient en partie du franchissement des vagues sur la dune de l'Ouest à marée haute et des précipitations d'eau dans la lagune elle-même. Cet équilibre est maintenu par le fait que le niveau d'eau de la marée à l'extérieur de la lagune du côté ouest est en moyenne plus souvent au-dessous qu'au-dessus du niveau d'eau dans la lagune, et donc dans la passe de la dune de l'Ouest.

Les vitesses des courants obtenus à l'aide du modèle mathématique (tableau 3) se comparent bien avec celles mesurées pour une profondeur d'eau de 0,3 m, et ce, particulièrement à marée baissante. Dans ces conditions, la variation correspondante du niveau d'eau dans la lagune serait de 2 cm, ce qui est dans l'ordre de grandeur des variations mesurées en nature (tableau 6) si on tient compte qu'une portion de la variation de ces niveaux d'eau est causée par l'influence du vent. Il faut rappeler que les résultats obtenus à partir du modèle

mathématique ne sont qu'approximatifs, étant donné la définition plus ou moins précise des paramètres utilisés et que l'écoulement hydraulique ne s'effectue pas de façon symétrique sur tout l'ensemble du cycle de la marée, conditions pour lesquelles le modèle a été développé. Malgré cela, les résultats sont comparables et ils montrent que la passe sur la dune de l'Ouest a une influence très faible sur les variations et les changements de volume d'eau dans la lagune (moins de 2% du volume d'eau de la lagune par jour).

D'après le critère d'Escoffier (1977), cette passe est instable. Elle est maintenue ouverte par le fait que le surplus d'eau accumulé dans la lagune par les précipitations et le franchissement des vagues par dessus la dune est expulsé par cette passe. Comme nous le verrons plus loin, il en découle que le niveau moyen de l'eau dans la lagune est surélevé par rapport à celui à l'extérieur de celle-ci.

STABILITÉ DE LA PASSE SUR LA DUNE DE L'EST

STABILITÉ HYDRAULIQUE

Certaines passes sont permanentes et demeurent ouvertes sans grande modification; d'autres sont éphémères, ouvrant et fermant sous l'influence des forces naturelles. Des travaux ont été entrepris en vue de déterminer les caractéristiques hydrauliques liées à la stabilité des passes. Une relation définissant cette stabilité a été présenté par O'Brien (1931) et est de la forme:

$$A_c = a P_t^b \qquad (12)$$

dans laquelle A_c est l'aire de la section transversale de la gorge de la passe mesurée au-dessous du niveau moyen de l'eau et Pt le prisme de la marée ou le volume d'eau emmagasiné dans la lagune entre la pleine et la basse mer de la marée de vive-eau (grande marée). Les valeurs de a et de b ont été évaluées pour un grand nombre de lagunes (ou baies) et dépendent du type de marée (diurne ou semi-diurne) et selon la présence ou non de jetées à l'embouchure de la lagune (O'Brien, 1969; O'Brien et al., 1972, 1974; Johnson, 1973). Les données analysés par Jarrett en 1976 ont conduit aux valeurs de a et b présentées dans le tableau 4, dans lequel sont aussi présentées les valeurs obtenues par O'Brien (deux dernières rangées dans le tableau). Le coefficient a représente une valeur ayant des dimensions. Il est valable pour le système métrique dans lequel A_c est en m^2 et P_t en m^3.

Les sections des passes sont plus grandes sur la côte du Golfe du Mexique (cas 8) que sur les côtes de l'Atlantique (cas 7) et du Pacifique (cas 9). Ces différences proviennent principalement des conditions de marées et de vagues qui varient d'une région à l'autre. D'autre part, en présence de deux jetées (cas 10 et 13) les sections de l'entrée sont plus grandes que dans les cas avec une ou sans jetée (cas 11 et 14). En effet, les jetées ont pour effet de canaliser l'écoulement et de réduire la dérive littorale des sédiments. Le cas 12, qui englobe tout, conduit à des valeurs intermédiaires.

A cause de la présence du point amphidromique de la marée semi-diurne au sud-ouest des Iles-de-la-Madeleine, les marées y sont faibles et sont de type mixte. Du côté est des Iles-de-la-Madeleine la marée est du type plutôt semi-diurne, tandis que du côté ouest de type plutôt diurne. De plus les vagues sont plus énergétiques du côté ouest que du côté est. Pour ces raisons, il est indiqué d'aménager une ouverture du côté est plutôt que du côté ouest. D'ailleurs les passes principales des lagunes aux Iles-de-la-Madeleine (Grande Entrée, Havre aux Maisons et anciennement Havre aux Basques) se situent toutes du côté est.

Selon ces conditions, l'aire de la section de la passe serait de 840 m^2 pour le cas général (cas 12 du tableau 4) pour un prisme de la marée de 12×10^6 m^3. Avec deux jetées (cas 13) l'aire serait de 940 m^2, tandis qu'avec une ou sans jetée (cas 14) l'aire correspondante serait plutôt de 790 m^2. Une fois la passe réouverte, sa section moyenne devrait alors se situer aux environs de ces valeurs, qui sont beaucoup plus grandes que l'aire critique de 320 m^2 obtenue du calcul hydraulique. Selon l'analyse faite au chapitre précédent, une telle section se situe alors dans des conditions de stabilité hydraulique. Il y a lieu de mentionner que la dérive littorale peut affecter ces conditions, ce qui fait l'objet de la présentation suivante.

STABILITÉ SÉDIMENTOLOGIQUE

L'eau qui sort par la passe, dans une direction transversale à la côte, dévie les sables

de leur mouvement général de propagation parallèlement à celle-ci sous l'influence de la houle. Les sables déviés continuent alors leur périple le long de la côte sous forme d'une barre de sable de forme plus ou moins arquée devant l'entrée de la lagune. Ceci résulte en la présence d'un haut-fond le plus souvent gênant pour la navigation.

La quantité de sable dévié dépend du rapport entre le volume d'eau E qui sort par la passe et le volume de sable Qg qui franchit une perpendiculaire à la côte Qg durant un temps donné, par exemple, sur une base annuelle. Les limites du rapport E/Qg sont comprises entre 1×10^5 et 1×10^6, où la limite supérieure correspond au cas où la presque totalité des sables est déviée et la limite inférieure au cas où les sables ne sont pratiquement pas déviés. Ce sont pour les valeurs intermédiaires de ce rapport qu'il y a formation de dépôts en forme d'arcs, de lunules ou de deltas immergés, qui font plus ou moins saillie sur le fond (Larras, 1964).

Sur une base annuelle, le volume total d'eau qui entre ou qui sort de la lagune est estimé à:

$$E = 706 \times 12 \times 10^6 \times 0{,}7 = 6{,}0 \times 10^9 \text{ m}^3 \qquad (13)$$

dans lequel 706 est le nombre de marées semi-diurnes par année, 12×10^6 est l'aire de la lagune en m^2 correspondant au niveau moyen de l'eau et 0,7 est le marnage moyen de la marée en mètres selon les Tables des marées et courants du Canada (Pêches et Océans Canada, 1989). Ceci donne donc comme limites inférieure et supérieure du transport littoral total (ou global) des valeurs respectives de 6 000 et 60 000 m^3/an. Ces valeurs ne sont valables que si la section de la passe est suffisamment grande pour que le marnage à l'intérieur de la lagune soit pratiquement le même que celui à l'extérieur de la lagune, ce qui est le cas en adoptant une section de l'ordre de 850 m^2.

Bruun (1978, 1981) caractérise les conditions de stabilité de l'entrée en fonction du rapport entre le prisme de la marée Pt correspondant à une marée de vive-eau et la quantité de transport littoral total Qg devant l'entrée sur une base annuelle. A partir de l'analyse d'un certain nombre de lagunes, il propose les valeurs suivantes:

$P_t/Q_g > 150$:

Les conditions de stabilité sont bonnes et la barre est peu formée.

$100 < P_t/Q_g < 150$:

Les conditions de stabilité sont moins bonnes et la barre au large commence à se développer.

$50 < P_t/Q_g < 100$:

La barre est bien developpée, mais il y a un chenal à travers la barre.

$20 < P_t/Q_g < 50$:

Entrée type en présence d'une barre sur laquelle la dérive littorale transite.

$P_t/Q_g < 20$:

L'entrée est instable et correspond plutôt à un canal déversoir.

Pour obtenir de bonnes conditions de stabilité, la dérive littorale totale ne devrait pas excéder 80 000 m^3/an, pour la passe suffisamment ouverte pour que la marée pénètre dans la lagune sans réduction appréciable de son amplitude, c'est-à-dire pour un prisme de marée de 12×10^6 m^3 correspondant à une marée de vive-eau. Compte tenu de l'absence d'une barre développée devant la passe avant sa fermeture, le rapport P_t/Q_g devait se situer entre les limites 100 et 150, c'est-à-dire fournissant un transport littoral total entre 80 000 et 120 000 m^3/an. Ces limites donnent des valeurs de la dérive littorale beaucoup plus fortes que celles proposées par Larras (1964) et ces différences sont difficiles à expliquer, à moins que Q_g représente une dérive littorale nette plutôt que brute (ou totale). Les limites proposées par Bruun (1978, 1981) semblent plus réalistes et, pour cette raison, seront retenues dans ce qui suit.

Le budget sédimentaire de la dune de l'Est n'est pas facile à établir. Le modèle développé pour l'ensemble des Iles-de-la-Madeleine par Drapeau et Mercier (1987), à partir de mesures de profils de plage et de comparaison de cartes et de photographies aériennes de 1963 et 1977, ne peut s'appliquer directement au littoral de la baie de Plaisance sans considérer les échanges entre les zones littorales et sublittorales. Selon cette étude, le transport littoral sur la dune de l'Est irait du nord vers le sud (fig. 11), tout comme celui proposé antérieurement par Owens (1976) et montré sur la figure 12. La principale

différence entre les deux modèles se situe dans le secteur de la dune de l'Ouest, où Owens suggère une divergence du transport littoral au niveau de la section médiane. Toutefois, les calculs de la capacité de transport à l'aide d'un modèle numérique (Ouellet et Massé, 1978a), et l'examen de l'évolution du delta de jusant après la fermeture de la lagune (SOGEAM, 1985), fournissent des résultats différents dans le secteur de la dune de l'Est. Ces calculs ont été refaits dans le cadre de cette étude et sont présentés dans la section "Climat des vagues".

Nous avons repris les résultats de Mercier (1987) avec les hypothèses qu'il n'y a pas d'échange de sédiments entre la baie de Plaisance et le littoral, c'est-à-dire que le transport des sédiments s'effectue le long du littoral, et que le Gros Cap représente un point de divergence de la dérive littorale. Les résultats sont présentés dans le tableau 5 pour les cellules 407 à 434 de 500 m de longueur et allant du Gros Cap (cellule 407) jusqu'à environ 3 km au sud de la passe de la dune de l'Est, qui se situe au voisinage des cellules 428 et 429. Pour les autres cellules allant vers le sud, il n'y a presque pas eu de changement dans les zones sableuses, et l'érosion provient principalement des zones rocheuses où le taux est estimé à 2 500 m^3/an. Dans ce tableau, les trois dernières colonnes représentent respectivement le taux d'érosion (signe moins) ou de sédimentation (signe plus) sur 14 ans, le taux annuel et enfin la dérive littorale annuelle, obtenue à partir du volume de sédiments qui entre dans la cellule plus l'érosion ou moins la sédimentation. A noter que le transport normal des sédiments a été négligé. Dans cette dernière colonne, le signe plus représente un transport net des sédiments vers le sud et le signe moins vers le nord. Ces résultats montrent qu'avec ces hypothèses le transport littoral s'effectuerait du nord vers le sud dans la partie nord de la dune de l'Est et du sud vers le nord dans sa partie sud. Rappelons que ces résultats présupposent qu'il y a peu d'échanges de sédiments entre la baie de Plaisance et le littoral. Ceci reste à être confirmé, mais la présence de sédiments fins dans la baie de Plaisance (CSSA, 1986) pourrait justifier en partie cette approche.

La détermination de la capacité de transport littoral à l'aide d'un modèle numérique (Ouellet et Massé, 1978b) est rendue difficile à cause de la complexité de cette région des Iles-de-la-Madeleine. Ceci peut être illustré à l'aide de diagrammes de diffraction des vagues approchant le littoral des Iles-de-la-Madeleine dont un exemple pour la direction d'approche pour une période de 9 secondes est présenté à une petite échelle (région plus grande) à la figure 13 et à une échelle plus grande (région plus restreinte) à la figure 14. Ces diagrammes montrent que les vagues subissent des transformations complexes, et ce, particulièrement pour les périodes plus grandes, tel que noté par les croisements des orthogonales, lesquelles représentent en quelque sorte les trajectoires suivies par les vagues. Ces croisements d'orthogonales, appelés caustiques, résultent en des superpositions de vagues en provenance de directions différentes, après quoi il est difficile d'évaluer leur comportement. Ceci peut résulter en une perte d'énergie par déferlement, comme celle qui se produit lorsque la vague déferle par l'insuffisance de profondeur d'eau. La méthode ne tient pas compte de ces phénomènes, à l'exception de la limite du déferlement régulier par l'effet de profondeur, comme cela est noté par l'arrêt des orthogonales avant qu'elles n'arrivent jusqu'à la rive.

L'examen de ces graphiques montre que le secteur nord de la dune de l'Est est relativement bien protégé contre les vagues en provenance du nord-est et qu'à l'inverse le secteur sud l'est contre les vagues en provenance de l'est. Les vagues de l'est-nord-est sont celles qui réussissent à mieux pénétrer dans la baie de Plaisance. En ce qui concerne les directions est-sud-est et sud-est, la présence de l'Île d'Entrée et de la dune du Sandy Hook protège la dune de l'Est contre les vagues en provenance de ces directions. Certaines orthogonales réussissent à pénétrer dans la baie de Plaisance, mais souvent après avoir croisé d'autres orthogonales, ce qui empêche une description adéquate de leur comportement.

Dans ce contexte, il apparaît que les résultats présentés dans le tableau 5 fournissent une limite supérieure de la dérive littorale au voisinage de l'ancienne passe de la dune de l'Est. Le taux de transport littoral à cet endroit serait alors de l'ordre de 46 milliers de mètres cubes par année, et ce, vers le nord. Ce volume représente une quantité de transport net, c'est-à-dire la différence entre les volumes transportés respectivement vers le nord et vers le sud, dont la somme est le volume de transport brut, c'est-à-dire la quantité de transport littoral total Q_s. Ce sujet sera réexaminé dans la section "Climat des vagues".

VARIATIONS DES NIVEAUX D'EAU

VARIATIONS DES NIVEAUX D'EAU AVANT RÉOUVERTURE

La connaissance de la variation des niveaux d'eau est un élément de base à l'étude des divers scénarios d'intervention. A cet effet, des mesures marégraphiques ont été prises au cours de l'automne 1986 (Consultants Saint-Laurent, 1987) et puis répétés au cours de l'automne 1988 dans le cadre de la présente étude. Les éléments à considérer sont les variations du niveau d'eau dans la lagune par rapport à celles à l'extérieur de la lagune, et ce, avant et après réouverture.

Selon les relevés effectués au cours des mois de septembre et octobre 1988 en deux stations localisées à l'intérieur de la lagune de part et d'autre de l'ancienne passe sur la dune de l'Est (voir figure 28), l'élévation du niveau d'eau de la lagune est de l'ordre de 0,3 m au-dessus du niveau moyen de l'eau, qui lui-même est de l'ordre de 0,75 m au-dessus du zéro marégraphique de Cap-aux-Meules. L'examen de ces données présentées dans le tableau 6 montre que les variations du niveau d'eau dans la lagune sont négligeables et sont dues principalement aux effets atmosphériques, aux précipitations et au franchissement des vagues sur la dune de l'Ouest. La petite passe sur la dune de l'Ouest maintient les échanges d'eau entre la lagune et le golfe du Saint-Laurent. Durant cette même période, les variations de niveau d'eau ont été enregistrées à la station marégraphique de Cap-aux-Meules (Station No 1970), à partir desquelles on a tiré les hauteurs et les heures de la pleine mer et de la basse mer indiquées dans le tableau 7.

A partir d'un programme sur ordinateur basé sur l'analyse harmonique, c'est-à-dire par la superposition de 61 composantes de la marée (Forrester, 1983), il est possible de prédire la hauteur de la marée en une station marégraphique donnée. Les courbes de la marée ainsi obtenues à Cap-aux-Meules (No 1970) et à Havre-Aubert (No 1964), pour les mois de septembre et octobre 1988, sont présentées respectivement sur les figures 15 et 16. Les heures et les hauteurs de pleine et de basse mer correspondantes sont présentées dans les tableaux 8 et 9 pour fins de comparaison avec celles mesurées à Cap-aux-Meules (tableau 7).

Un examen de ces tableaux montre que les valeurs prédites à Cap-aux- Meules (tableau 8) ne concordent pas bien avec les valeurs mesurées. Par contre, de façon surprenante, les valeurs mesurées concordent relativement bien avec celles prédites à la station marégraphique de Havre-Aubert (tableau 9), la différence étant principalement causée par les vagues de tempête. On doute qu'il peut s'être glissé une erreur dans les valeurs des composantes harmoniques qui ont été fournies pour la station de Cap-aux-Meules. La fiabilité des données de Havre-Aubert et la proximité de cette station marégraphique du site à l'étude nous amènent à surtout retenir les données prédites à cette station pour les fins de la présente étude.

A l'examen des courbes des marées prédites à Cap-aux-Meules (fig. 15) et à Havre-Aubert (fig. 16), on peut voir le caractère mixte des marées à cet endroit qui sont tantôt diurnes (une marée par jour), tantôt semi-diurnes (deux marées par jour). Les hauteurs d'eau varient principalement entre 0,45 et 1,05 m, pour atteindre en vive-eau des variations entre 0,3 et 1,2 m, et ce, pour les deux stations marégraphiques. Par contre, les courbes correspondantes de la marées à l'Étang-du-Nord (Station No 1990) sont passablement différentes (fig. 17). Celles-ci ont un caractère diurne (une marée par jour) avec des périodes de grandes marées (vives-eaux) et de faibles marées (mortes-eaux). La présence du point amphidromique au sud-ouest des Iles-de-la-Madeleine est responsable de ces changements de types de marée d'un côté par rapport à l'autre des Iles-de-la-Madeleine. La figure 18 montre les courbes de la marée à ce même endroit déterminées à partir d'une autre série de mesures fournies par le Service de données sur le milieu marin (station No 1991). Les écarts entre ces deux séries de données (fig. 17 et 18), qui atteignent 0,1 m, sont dues principalement aux courtes périodes de mesures (2 mois) utilisées pour évaluer les valeurs des composantes harmoniques.

Il faut enfin noter que le calcul des variations de niveau d'eau ne tient compte que des effets astronomiques. En réalité, les variations réelles sont différentes, ce qui est dû principalement aux tempêtes qui, sous l'action des variations de pression et du frottement du vent sur la surface de l'eau, entraînent des déviations par rapport à ces valeurs prédites. Nous ne disposons pas de mesures pour préciser l'ampleur de ces déviations, mais on peut présumer, sur la base

de mesures à d'autres stations marégraphiques autour du golfe du Saint-Laurent, que celles-ci peuvent atteindre l'ordre de grandeur du marnage moyen de la marée aux Iles-de-la-Madeleine, c'est-à-dire de l'ordre du mètre.

VARIATIONS DES NIVEAUX D'EAU APRÈS RÉOUVERTURE

Après réouverture de la lagune du Havre aux Basques avec les caractéristiques de l'entrée établies précédemment, le niveau d'eau dans la lagune suivra pratiquement celui à l'extérieur de celle-ci. De plus, le niveau moyen de l'eau s'abaissera d'environ 0,3 m par rapport aux conditions actuelles pour correspondre au niveau moyen à l'extérieur de la lagune. Cet abaissement du niveau moyen de l'eau dans la lagune entraînera de toute évidence la fermeture de la passe sur la dune de l'Ouest. On peut donc, à toute fin pratique, utiliser les variations des niveaux d'eau à Havre-Aubert ou à Cap-aux-Meules comme celles qui se produiront dans la lagune.

De façon à pouvoir obtenir des statistiques sur ces variations du niveau d'eau dues à la marée, on a généré des données horaires de hauteur de la marée aux deux stations marégraphiques sur toute l'année 1988, soit 8 784 valeurs. Les tableaux 10 et 11 présentent respectivement pour les stations de Cap-aux-Meules et de Havre-Aubert les statistiques de ces données obtenues à l'aide d'un logiciel de traitement des données marégraphiques (Dupuis et Ouellet, 1988). Le nombre d'heures, leur fréquence et leur pourcentage de dépassement sont fournis par intervalles de 0,1 m. Par exemple, le nombre d'heures pendant lesquelles la hauteur d'eau est comprise entre 1,1 et 1,2 m est de 213 heures à Cap-aux-Meules et de 75 heures à Havre-Aubert durant l'année 1988 (8784 heures), ce qui correspond respectivement à des fréquences de 2,425% et de 0,854%. Étant donné que la hauteur d'eau de la marée prédite à ces deux endroits ne dépasse pas 1,2 m, ces fréquences relatives correspondent également aux pourcentages de dépassement. Ces pourcentages de dépassement ont été tracés sur la figure 19. Ces résultats montrent que les hauteurs de la marée sont légèrement plus élevées à Cap-aux-Meules qu'à Havre-Aubert. Même s'il y a encore lieu de se questionner sur la validité des données prédites à Cap-aux-Meules, leurs statistiques sont comparables à celles de Havre-Aubert.

Il y a lieu, toutefois, de rappeler que les variations réelles seront différentes de celles-ci, principalement sous l'influence des facteurs météorologiques. Ceci peut être constaté sur les figures 20 à 23, qui présentent les courbes des marées mesurées durant l'automne 1986 (Consultants Saint- Laurent, 1987) et prédites sur la même période respectivement à Cap-aux-Meules et à l'Étang-du-Nord. A noter que sur les figures 20 et 22 (valeurs mesurées) les hauteurs d'eau ont été ramenées à la moyenne, contrairement aux valeurs prédites (fig. 21 et 23) où elles sont rapportées au zéro marégraphique. L'examen de ces résultats montre que les variations des niveaux d'eau causées par les marées astronomiques (fig. 21 et 23) sont sensiblement déformées par les vagues de tempête (fig. 20 et 22). Par contre, les statistiques globales des niveaux mesurés et prédits devraient être comparables, les écarts étant légèrement plus grands pour les variations réelles que celles prédites, ces dernières étant seulement dues à l'influence astronomique. Les courbes de fréquence présentées sur la figure 19 peuvent donc servir, à toute fin pratique, pour évaluer les statistiques des hauteurs d'eau dans la lagune après réouverture.

TAUX DE MÉLANGE

Il y a peu d'information dans la littérature sur les taux d'échange de l'eau dans les lagunes. Par contre, ce sujet a été traité plus en profondeur dans le cas des estuaires. On peut donc en première approximation, faire appel à ces développements pour étudier cet aspect du problème dans le cas de la lagune du Havre aux Basques.

Il existe une formule simple qui donne en première approximation le temps d'échange de l'eau dans un estuaire en fonction du prisme de la marée (Dyer, 1973):

$$T_r = (V + P_t)/P_t \qquad (13)$$

dans laquelle T_r est le temps de renouvellement de l'eau dans la lagune en nombre de cycles de marée, P_t le prisme de la marée et V le volume d'eau dans la lagune à marée basse. En admettant que la section de la lagune varie peu avec la marée, cette formule se réduit à:

$$T = (h_b + 2a_b)/(2a_b) \qquad (14)$$

dans laquelle h_b est la profondeur d'eau à marée basse et 2 a_b le marnage moyen de la marée dans la lagune. La profondeur d'eau à marée basse dans la lagune du Havre aux Basques est de l'ordre de 1,4 m. En supposant que l'ouverture soit suffisamment grande pour que la marée dans la baie de Plaisance pénètre dans la lagune sans perte d'énergie appréciable, le marnage moyen de la marée serait alors de 0,7 m. Dans ce cas le temps de renouvellement de l'eau dans la lagune serait de trois cycles de marée, soit environ deux jours, étant donné l'aspect mixte semi-diurne de la marée dans la baie de Plaisance. On peut supposer que c'est ce qui se produisait avant la fermeture de la lagune en 1957 et ce qui se produirait une fois la lagune réouverte.

Présentement, les variations du niveau d'eau dans la lagune causées par les échanges d'eau à travers la passe sur la dune de l'Ouest sont de l'ordre de 0,02 m selon le modèle décrit précédemment. Avec cette valeur, le temps de renouvellement de l'eau dans la lagune serait présentement de 71 cycles de marée, soit plus de deux mois si on considère l'aspect diurne de la marée, c'est-à-dire une marée par jour, sur le côté ouest des Iles-de-la-Madeleine (fig. 16).

Cette formule ne donne qu'un ordre de grandeur. En effet cette formule donne un temps de renouvellement de l'eau beaucoup plus court que celui obtenu en utilisant des techniques plus avancées. Ceci provient du fait que cette formule présuppose que l'eau qui entre dans la lagune se mélange complètement avec celle déjà présente et que l'eau qui sort de la lagune ne rentre pas au cours du cycle suivant. Dans le cas de la lagune du Havre aux Basques, il est estimé que le temps de renouvellement de l'eau dans la lagune serait inférieur à une semaine, une fois réouverte.

CLIMAT DES VAGUES

CLIMAT DES VAGUES PRÈS DE L'OUVERTURE

Dans le but d'évaluer l'effet des vagues sur les ouvrages et sur la dérive littorale, nous avons cherché à obtenir le climat des vagues près de l'ouverture. En l'absence d'enregistrements des vagues dans la région, le climat des vagues a été établi à l'aide d'un modèle mathématique appliqué aux enregistrements de vents à la station météorologique de Cap-aux-Meules. Selon une analyse des vents effectuée par Anctil et Ouellet (1988), la station météorologique située sur l'île du Cap-aux-Meules (7052960) et relocalisée en 1983 à l'aéroport de Havre- aux-Maisons, présente l'ensemble le plus complet des données de cette région entre les années 1969 et 1982. La figure 24 montre la rose des vents pour cette station sur la période d'eau libre (mi-avril à mi-décembre) sur cette période de quatorze (14) années. Sur cette figure, les fréquences croissent de l'extérieur vers l'intérieur, passant de 0,01% à 30% selon une échelle logarithmique, afin de mettre en évidence les vents les plus violents. On peut donc y lire, selon les seize directions principales de la rose des vents, les fréquences des vents dont la vitesse est supérieure à 0, 20, 40, 50 et 60 km/h. On y indique aussi le nombre d'heures de la période, le nombre de valeurs horaires disponibles, le pourcentage de couverture et la période de temps calme.

Le modèle applique la méthode S.M.B. (Shore Protection Manual, 1984) de façon séquentielle aux données horaires de vent qui sont préalablement lissées pour atténuer les variations brusques dans la direction du vent. Le modèle permet alors de déterminer les vagues en un point situé au large de l'aménagement étudié. L'application de la méthode demande cependant que l'on détermine les fetchs selon les directions d'intérêt, ce qui est fait à l'aide de la méthode des fetchs effectifs. Le tableau 12 résume les valeurs impliquées dans le calcul pour les directions allant du nord au sud-est. Il faut noter que le point de calcul pour les directions nord, nord-nord-est, est-sud-est et sud-est a été placé près de l'entrée de la passe puisque pour ces directions nous négligeons les effets de réfraction. Pour les autres directions, le point de calcul des fetchs a été pris au large, dans la baie de Plaisance, à mi-chemin entre l'île du Havre aux Maisons et l'île d'Entrée par une profondeur d'eau de dix brasses (18,3 mètres).

Les vagues ont été reconstituées à partir des données de vent de Cap-aux-Meules disponibles entre 1953 et 1982 sont présentées selon les directions et paramètres donnés au tableau 13. Les valeurs cumulées pour toutes les directions sont données en langue anglaise au tableau 14. Les pourcentages calculés à partir des effectifs sont indiqués à droite pour les hauteurs et en

bas pour les périodes, avec des notes explicatives en bas de page. A partir de ces informations, on a tiré la rose des vagues montrée sur la figure 25. Celle-ci est présentée suivant le même format que la rose des vents, et ce, pour des hauteurs de vagues supérieures à 0, 0,4, 0,8, 1,5 et 3,0 mètres. Ces résultats montrent qu'on peut s'attendre à avoir des vagues au large atteignant 6 mètres de hauteur significative et que, par ordre d'importance, ce sont les secteurs nord-est, est et est-nord-est qui fournissent les pires conditions. A partir de ces statistiques de vagues, on a aussi déduit un certain nombre de cas représentatifs des conditions qui prévalent dans ce secteur et étudié leur transformation jusque près de l'entrée de la lagune. Ces cas sont présentés dans le tableau 15, où l'on retrouve ces conditions classées par direction et par période de vagues par intervalle de 2 s à partir de 2 s. Les paramètres listés sont la direction des vagues près de l'entrée, leur coefficient de hauteur, c'est-à-dire le rapport entre la hauteur des vagues en ce point et celle au large, la hauteur des vagues au large et leur fréquence d'apparition, exprimée en fréquence relative et en nombre d'heures d'occurrence durant la saison d'eau libre (huit mois ou 5844 heures).

Afin de tenir compte des modifications que subissent les vagues au cours de leur passage du large à l'entrée de la lagune, dues aux effets combinés de la variation de la profondeur d'eau, de la réfraction et du frottement sur le fond, nous avons fait appel à un second modèle numérique. La bathymétrie nécessaire en vue des calculs a été numérisée sur la carte no 4151 du Service hydrographique du Canada. Le modèle numérique fournit les coefficients de hauteur et les changements de la direction de propagation des vagues, à partir desquels on peut tracer les plans des vagues, qui permettent de visualiser leur comportement et les phénomènes de concentration et de dispersion d'énergie. Les diagrammes de réfraction présentés dans les figures 13 et 14 représentent des exemples de résultats de ce programme. Les conditions de niveau moyen ont été utilisées lors des calculs, soit une valeur de 0,75 mètre ajoutée aux profondeurs de la carte.

A partir de ces coefficients de hauteur, il est possible de transposer les statistiques des vagues de l'eau profonde jusqu'au site d'intérêt. Les résultats ainsi obtenus sont présentés en langue anglaise au tableau 16 suivant le même format que précédemment. La rose des vagues correspondante est montrée sur la figure 26, afin de pouvoir visualiser les conditions de vagues ainsi obtenues près de l'entrée de la lagune du Havre aux Basques. A noter que les directions d'approche des vagues, qui ont été admises égales à celles du vent, représentent toujours les directions au large. Ces résultats montrent qu'on peut s'attendre à obtenir des vagues de l'ordre de 3 mètres près de l'extrémité des jetées si la profondeur d'eau est suffisante pour qu'elles ne déferlent pas. Ces données peuvent alors être utilisées pour le dimensionnement des digues, en particulier près de leur extrémité. Rappelons toutefois que ces valeurs ne sont qu'indicatives et qu'il serait opportun de procéder à leur vérification dans le cadre d'une campagne de mesures de vagues.

ÉVALUATION DE LA CAPACITÉ DE TRANSPORT LITTORAL

Les données de vagues établies précédemment (tableau 15) ont été utilisées en vue d'estimer la capacité de transport littoral sur la dune de l'Est devant le secteur de l'entrée projetée de la lagune. Cette dérive littorale a été évaluée à l'aide d'un modèle numérique (Ouellet et al., 1985) basée sur la puissance développée par les vagues lors de leur déferlement près de la côte (Shore Protection Manual, 1984).

Le modèle a été appliqué pour évaluer la capacité de transport littoral sur une bande de 6 km de rive entourant la passe. Ces calculs ont été effectués sur 30 éléments de 200 m de longueur. De façon à pouvoir comparer les résultats avec ceux de Mercier (1987) présentés dans la discussion sur la stabilité de la passe de la dune de l'est, nous avons ramené les valeurs à des cellules de 500 m numérotées comme précédemment (tableau 5).

Les résultats de ces calculs sont présentés dans le tableau 17, pour les cellules 423 à 434 des unités X (B) et X (C) (Mercier, 1987). Dans ce tableau, on présente les calculs de la capacité de transport littoral brut ($Q_S + Q_N$) et net ($Q_S - Q_N$), le signe moins dans ce dernier cas signifiant alors une dérive littorale nette vers le nord. Par continuité et en négligeant le transport normal, on peut déduire le volume d'érosion (-) ou de sédimentation (+) dans chaque cellule, ce qui est fourni dans la dernière colonne.

Une comparaison de ces résultats avec ceux présentés dans le tableau 5 montre que les valeurs calculées sont plus fortes que celles déduites des mesures par un facteur variant d'une cellule à l'autre. A cause de cette variabilité, il est difficile d'ajuster les résultats les uns par rapport aux autres. Les résultats de la dérive littorale et des volumes d'érosion et de sédimentation concordent relativement bien à l'exception de la partie nord où les résultats sont dans des sens opposés. Il faut rappeler que la difficulté de définir le climat des vagues dans cette région et que les hypothèses émises pour obtenir les résultats présentés dans le tableau 5 ne doivent pas nous surprendre quant à la différence de ces résultats. Les deux approches fournissent quand même une sédimentation au niveau de la passe, ce qui est confirmé en nature. Ils ne sont qu'indicatifs et ne peuvent être améliorés qu'à partir d'un programme de mesures appropriées.

SOLUTIONS D'AMÉNAGEMENTS

GÉNÉRALITÉS

Pour s'assurer d'une certaine stabilité de profondeur des passes, qui conditionne l'ouverture d'une lagune, on peut utiliser l'une ou l'autre des trois façons suivantes (Larras, 1964):

- Soit en augmentant les mouvements d'eau entre la lagune et la mer, par un meilleur calibrage des passes à l'aide de jetées ou par l'augmentation de volume des parties couvrantes et découvrantes de la lagune;
- Soit en réduisant le transit des matériaux littoraux par la construction d'ouvrages d'arrêt et d'épis en bordure de la côte;
- Soit en évitant le passage des matériaux devant la passe par un transit artificiel des sédiments ('by-pass').

Le maintien du débouché ouvert peut être réalisé à l'aide d'un calendrier de dragage plus ou moins programmé. Cependant il semble que c'est la construction de jetées, simple ou surtout double, qui s'est avéré le moyen le plus efficace pour remédier à ce problème. La construction de jetées vise un double but: améliorer l'écoulement dans la passe et réduire le transport littoral. Lorsque l'arrêt du transport littoral est jugé trop néfaste à la côte avoisinante, on peut alors avoir recours à un système assurant le transfert des sédiments à l'aval des ouvrages, c'est-à-dire dans la direction du transport des sédiments.

L'expérience montre que les courants de marée peuvent labourer les passes si la vitesse maximale du courant de marée dans la passe demeure supérieure à la vitesse limite d'érosion V_e des matériaux du fond, pendant 60 à 80% du temps. Il faut donc fixer la section moyenne du débouché telle que la vitesse maximale Vm soit de l'ordre de 2 à 5 fois V_e. Pour du sable fin à moyen ($0,25 < D < 0,5$ mm), la vitesse d'érosion est de l'ordre de 0,3 à 0,4 m/s, ce qui conduit à prendre des vitesses V_m comprises entre 0,6 et 1,5 m/s. Selon Bruun (1978, 1981), la vitesse moyenne maximale dans les passes se situe en général au voisinage de 1,0 m/s. Pour les résultats présentés dans le tableau 1, la section de la passe serait alors de l'ordre de 800 m^2 pour obtenir cette vitesse.

Il ne suffit pas de connaître la section moyenne du débouché de la lagune à la mer. Il faut savoir encore à quelle largeur de passe B_c et à quelle profondeur d_c (ou rayon hydraulique R_h) sous le niveau moyen, cette section correspond. Le rapport B_c/d_c augmente avec la dimension de la lagune et le degré d'exposition aux vagues, et est plus faible pour une passe en présence de deux jetées que sans jetée. Ce rapport varie grandement et se situe entre 15 et 300 (Larras, 1964; Bruun, 1978). En admettant une section de 850 m^2, ayant une largeur de 200 m par une profondeur d'eau moyenne de 4,25 m, le rapport B_c/d_c serait de l'ordre de 50. Un débouché moins large et plus profond nécessiterait son ouverture sur une plus grande distance, pour rejoindre l'isobathe correspondante à la profondeur du chenal, tandis qu'un débouché plus large et donc moins profond serait moins long. D'autre part, selon Larras (1964), le rapport entre la longueur de la passe L_c et la profondeur d'eau d_c est en général de l'ordre de 180. Pour une longueur de passe de 500 m et une section de 850 m^2, ceci conduirait à adopter une largeur de l'ordre de 300 m et la profondeur d'eau moyenne serait inférieure à 3 m. Les caractéristiques géométriques finales de la passe doivent être fixées en fonction de son coût de construction et du degré de stabilité à y assurer.

Pour améliorer les conditions de stabilité d'une passe, on a couramment recours à deux jetées longeant chaque côté de la passe et dûment prolongées vers le large. Ce prolonge-

ment s'étend habituellement jusqu'à une profondeur naturelle correspondant à la profondeur du chenal retenue. En plus d'assurer une stabilité à la passe, ces jetées constituent une barrière partielle à la dérive littorale. Par contre, cette interruption momentanée de la dérive littorale peut entraîner de l'érosion sur la partie aval, qui autrement recevrait cette quantité de sédiments. Pour assurer la continuité, il faudrait alors prévoir le passage du transit littoral par un by-pass (Shore Protection Manual, 1984). Ceci peut-être réalisé à l'aide de trappes à sédiments ou de jetées déversoirs qui, une fois les sédiments accumulés, sont vidangées à intervalles plus ou moins réguliers à l'aide de pompes à sédiments ou de dragues (Bruun, 1981). Toutefois la direction imprécise du transport littoral net laisse croire que cela ne devrait pas poser un problème important dans notre cas.

TRAVAUX D'AMÉNAGEMENT PROPOSÉS

Les travaux d'aménagement proposés ci-après sont basés sur le principe du rapprochement des conditions naturelles qui se sont révélées plutôt stables dans le passé, comme le montre le relevé bathymétrique de 1955 (fig. 27). Il s'agit alors d'amorcer le processus et de laisser la nature poursuivre le travail en vue d'amener la création d'un chenal ayant en gros les caractéristiques de celui qui existait avant la fermeture. Il faut, par contre, concevoir des ouvrages de protection de telle sorte que la stabilité des ouvrages connexes (pont, route) soit assurée.

Nous partons de l'hypothèse que le chenal aurait une surface mouillée de 850 m^2, soit 200 m de largeur par 4,25 m de profondeur d'eau moyenne, soit 3,5 m sous le zéro marégraphique, étant donné que le niveau moyen de l'eau est 0,75 m au-dessus de ce dernier. L'examen des photographies aériennes de 1952 et du plan bathymétrique de 1955 (fig. 27) montre que le chenal n'est pas perpendiculaire à l'alignement de la dune de l'Est, mais est dévié vers l'est- nord-est, faisant un angle d'environ 75° par rapport à l'axe de la route. Cette même orientation a été adoptée pour le canal proposé.

La localisation et deux coupes types du chenal proposé sont montrées sur la figure 28. Étant donné le coût très élevé de la pierre aux Iles-de-la-Madeleine et la longueur du chenal (environ 500 m), nous avons limité la protection par des enrochements à une centaine de mètres à partir du pont, et ce, sur chaque côté du chenal. Cette protection nous paraît suffisante pour se protéger à la fois contre les vagues et les courants. La grosseur des pierres de carapace a été prise entre 1 et 3 tonnes essentiellement pour résister à l'arrachement par les glaces. Ces pierres seraient posées sur une pierre filtre de 100 à 300 kg, elle-même placée sur un géotextile pour éviter que le sable traverse les couches de pierre. La pente du parement a été fixée à 1,5 horizontal dans 1 vertical, ce qui devrait être stable. Le pied de l'enrochement a été placé à 4,5 m sous le zéro marégraphique, mais il faudra vérifier lors de la conception finale la nécessité de placer les enrochements encore plus bas aux abords du pont. Au-delà de cette limite de 100 m, la pierre aiderait à maintenir le chenal ouvert, mais l'écoulement hydraulique devrait suffire pour assurer ce maintien, comme cela apparaissait être le cas dans le passé. Un suivi du comportement du chenal devra être fait après sa réouverture.

DRAGAGE DU CHENAL ET COÛT DES TRAVAUX

Trois méthodes différentes de dragage du chenal ont été envisagées, soit un dragage par équipement terrrestre, un dragage par équipement flottant à l'aide d'une drague à succion et à l'aide d'une drague mécanique. Les sites de rejet des sédiments et la période de réalisation des travaux sont des facteurs à considérer pour le choix de l'une ou l'autre de ces méthodes.

En effectuant le dragage par équipement terrestre, le matériel pourrait être étendu sur la plage avoisinante à une distance minimale de 1 km et sur une distance raisonnable de façon à ne pas modifier sensiblement le profil de la plage. Si cela s'avérait approprié sur le plan environnemental, les travaux pourraient être réalisés durant la période automnale et hivernale. Sur le plan technique, cette période peut occasionner des ralentissements des travaux, mais elle comporte certains avantages pour l'excavation et le transport des matériaux. A cela s'ajoute l'absence de vagues qui risquent de combler partiellement le chenal et de nuire au déroulement des travaux. Le travail pourrait être réalisé à l'aide de quatre pelles hydrauliques de 1,5 m^3 chacune, pour une production totale de 200 m^3/h, en supposant une disponibilité suffi-

sante de camions. La durée du travail serait alors de 2050 heures pour un volume de 410 000 m^3 de sédiments à draguer, estimé à partir du relevé bathymétrique effectué au cours de l'automne 1988, dont la section agrandie de la dune de l'Est au niveau de l'ancienne passe est montrée sur la figure 29.

Le dragage par équipement flottant à l'aide d'une drague à succion nécessiterait l'utilisation d'une conduite de 40 cm de diamètre pour pouvoir fournir 172 m^3/h sur une distance minimale de 1 km, ce qui équivaut à une durée de travail de 2400 heures. La période estivale serait la plus propice pour les travaux avec ce type d'équipement. Elle comporte des risques de bris et une connaissance précise des conditions du sol est requise pour évaluer le coût par cette méthode.

Le dragage à l'aide d'une drague mécanique nécessiterait l'immersion en mer des matériaux et le dragage du chenal à une profondeur suffisante pour permettre la circulation en tout temps des remorqueurs et des barges, ce qui entraînerait une augmentation du volume à draguer. Les travaux devraient aussi être réalisés durant la période d'eau libre. La production dépend de la capacité de l'équipement utilisé et de la distance du lieu de déversement en mer, à déterminer en accord avec le comité aviseur sur les rejets en mer. Avec l'hypothèse d'une production de 75 m^3/h par drague, cela signifie qu'il faudrait plus d'un équipement pour réaliser les travaux dans un délai inférieur à six mois, compte tenu aussi du volume plus élevé à draguer.

De ceci, il se dégage une préférence pour la méthode par équipement terrestre, mais son choix reste soumis aux contraintes environnementales et aux impératifs économiques de l'entrepreneur qui sera appelé à réaliser les travaux. Pour éviter que les sédiments viennent s'accumuler dans le chenal, il est préférable de débuter le creusage du côté ouest en allant vers l'est, c'est-à-dire vers la baie de Plaisance. Ces travaux débuteraient une fois les travaux de construction du pont et de protection de ce dernier complétés, sous la responsabilité du ministère des Transports du Québec. Les présents travaux débuteraient à une dizaine de mètres à l'est du pont vers la baie de Plaisance.

Le coût de dragage est estimé à 3 505 500$ sur la base de 410 000 m^3 à draguer au coût de 8,55 $\$/m^3$. Le coût de la protection est estimé à 455 000 $ sur la base d'un volume de pierres de 7 000 m^3 à 65 $\$/m^3$, incluant la pose de la membrane géotextile. Ce volume de pierres est réparti entre 4200 m^3 pour la pierre de carapace de 1 à 3 t et 2800 m^3 pour la pierre filtre de 100 à 300 kg. Si on inclut des honoraires de 730 000 $ et des débours de 90 000 $, le coût total du projet serait de 4 780 000 $ sur la base d'une estimation de classe «C» 1989. La durée prévue pour la réalisation du projet est de six mois.

ÉLÉMENTS À CONSIDÉRER

Si l'on se fie aux relevés de 1955 (fig. 27), il faut s'attendre à ce que le chenal se creuse dès que l'ouverture sera complétée. La cote d'équilibre du fond du chenal dans la partie centrale devrait plutôt se situer après quelque temps à près de 6 m sous le zéro marégraphique. La présence et surtout l'orientation des piliers du pont pourraient avoir une influence non négligeable sur cette cote d'équilibre et sur la position de la partie la plus profonde du chenal. La position de l'ouverture par rapport aux chenaux à l'ouest du pont dans la lagune peut être importante dans l'établissement de la cote d'équilibre, compte tenu du fait que le rétrécissement du chenal au niveau du pont ne correspond pas à celui avant la fermeture.

L'emplacement de cette ouverture peut aussi avoir une influence sur l'orientation future du chenal. Idéalement, il serait préférable que l'écoulement soit orienté de telle sorte que l'alignement naturel du chenal reste le même qu'avant la fermeture. La présence des piliers du pont pourrait aussi avoir une influence sur cet équilibre. La possibilité d'embâcles au niveau du pont peut également entrer en ligne de compte.

La présence de la protection en enrochement devrait toutefois limiter les déviations trop grandes de l'orientation de ce chenal par rapport à la valeur visée. Si l'équilibre final ne correspondait pas à ce qu'il était auparavant, à cause de la largeur et de la position de l'ouverture et de l'orientation des piliers, des mesures correctives devraient être éventuellement envisagées. Le fait de viser un état que l'on sait avoir été en équilibre limite grandement les risques associés à des changements de cet état. A cet effet, on pourrait faire appel à une étude en modèle réduit (Seabergh, 1979; Kieslich, 1981) pour la conception d'un tel aménagement. Cela

nécessiterait toutefois un investissement relativement important et les données nécessaires à son opération ne seraient pas nécessairement disponibles. Nous recommandons toutefois l'utilisation d'un modèle numérique bi-dimensionnel, qui permettrait de comparer l'écoulement dans le voisinage de la passe avant la fermeture et après la réouverture et d'optimiser la position du chenal et l'orientation des piliers du pont de façon à se rapprocher le plus possible des conditions naturelles antérieures.

La section trapézoïdale du chenal proposé a des pentes latérales de 1,5 horizontal dans 1 vertical. Dans le secteur non protégé, ces pentes seront instables, mais nous ne croyons pas que les réajustements de ces pentes remettent en cause la stabilité du chenal et les ouvrages connexes (pont et route). Si cela survenait, il faudrait apporter les correctifs appropriés.

Une comparaison des relevés de 1955 et 1988 (fig. 27 et 29) montre que la plage dans ce secteur s'est engraissée depuis la fermeture de la passe, ce qui a d'ailleurs été noté dans l'étude sédimentologique précédente. Cet engraissement a été plus important sur la plage au nord de l'ancienne passe qu'au sud de celle-ci, ce qui apparaît aussi confirmé par les résultats de l'étude numérique (cellule 428 par rapport à 429 du tableau 17). Il est donc possible qu'après le dragage du chenal on assiste à une érosion de la plage au nord du chenal.

Cette érosion se ferait au profit de la reformation du delta de jusant une fois le chenal ouvert. Il est possible d'estimer le volume de sédiments ($\forall$) en m^3 qui formera le delta de jusant quelque temps après réouverture. Selon les études de Dean et Walton (1973) et Walton et Adams (1976) citées dans le Shore Protection Manual (1984), le volume de sédiments qui s'accumulera dans le delta de jusant est fonction du prisme de la marée et du niveau d'activité des vagues. La loi proposée est de la même forme que celle définissant la stabilité hydraulique du chenal, c'est-à-dire:

$$\forall_* = a P_t^b \qquad (15)$$

dans laquelle b est égal à 1,23 et a varie en fonction du degré d'activité des vagues entre 2×10^{-4} et 3×10^{-4}, la valeur la plus forte correspondant à un niveau d'agitation plus faible. Il y a lieu de rappeler que ces valeurs du coefficient a ne s'appliquent que pour P_t et $\forall$ exprimés en m^3 puisque ce coefficient possède des unités. Dans le cas présent, ceci donne un volume de l'ordre de 150 000 m^3, en prenant respectivement 12×10^8 m^3 et 3×10^{-4} comme valeurs du prisme de la marée et du coefficient a. Ce volume accumulé dans le delta de jusant serait soutiré à partir du littoral.

Étant donné que la construction du chenal suivra celle du pont, l'information présentée devra être réajustée une fois les travaux d'aménagement relatifs au pont fixés par le ministère des Transports du Québec. Afin de pouvoir préciser les quantités et les coûts, il sera requis de disposer au site du projet 1) d'une topographie plus détaillée de la dune, 2) d'une bathymétrie plus complète de la zone littorale, 3) de forages pour connaître la qualité des sédiments à draguer, 4) d'une étude d'impact sur l'environnement pour déterminer la période de dragage autorisée et la méthode acceptable de rejet des sédiments, 5) des résultats de l'étude hydraulique que pourrait éventuellement demander Transport Québec et 6) des données du projet du pont à être réalisé par Transport Québec.

Enfin, une fois les travaux complétés, il sera nécessaire d'effectuer un suivi du comportement de ces aménagements. Dans le cas où l'on noterait une certaine déstabilisation, il faudra rapidement possible.

CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

La présente étude hydro-sédimentologique de la réouverture de la lagune du Havre aux Basques a été menée à partir d'une recherche bibliographique sur les mécanismes qui influencent la stabilité de la passe de l'entrée des lagunes. Les caractéristiques de la passe d'entrée proposée au site de l'ancienne ouverture sur le dune de l'Est ont été établies à l'aide d'un modèle simplifié de l'écoulement hydraulique et de critères généraux influençant sa stabilité. Ces critères sont basés principalement sur des relations impliquant la section de la passe, le prisme de la marée et le transport littoral des sédiments. Les caractéristiques hydrauliques de la petite passe sur la dune de l'Ouest ont aussi été étudiées sur la base des mesures effectuées à l'automne 1988.

De façon à obtenir une entrée stable, la section de l'ouverture de la lagune devrait être de l'ordre de 800 m^2. Sur une largeur de 200 m,

la profondeur d'eau moyenne serait de 4 m avec une profondeur au centre du chenal de l'ordre de 6 m. Dans ces conditions, la marée dans la baie de Plaisance pénétrerait dans la lagune sans subir une réduction appréciable de son amplitude et les variations du niveau d'eau y suivraient approximativement celles de la baie de Plaisance. Pour un prisme de la marée de l'ordre de 12×10^6 m^3 correspondant à des conditions de grande marée avec un mètre de marnage, la vitesse moyenne maximale de l'écoulement dans la passe se situerait au voisinage de 1 m/s. Le taux de renouvellement de l'eau dans la lagune serait inférieur à une semaine, par rapport au taux actuel qui est supérieur à deux mois et qui s'effectue par l'intermédiaire de la petite passe sur la dune de l'Ouest. Les variations actuelles du niveau d'eau dans la lagune entraînées par l'écoulement à travers cette passe sont très faibles, étant de l'ordre de 2 cm.

En vue de stabiliser l'ouverture, on pourrait construire deux jetées longeant les côtés du canal et s'étendant jusqu'à une certaine distance sur le littoral. Cependant, le coût élevé de la pierre aux Iles-de-la-Madeleine et la stabilité relative de la passe naturelle avant sa fermeture nous amènent à ne proposer qu'une protection partielle en pierres sur une centaine de mètres immédiatement à l'ouest du pont projeté et à laisser le reste du chenal vers la baie de Plaisance sans protection. Il faudra chercher à s'assurer que la position de l'ouverture et l'orientation des piliers du pont soient telles que le patron de l'écoulement se rapproche le plus possible de celui avant la fermeture. A cet effet, nous recommandons la réalisation d'une étude à l'aide d'un modèle numérique bidimensionnel hydrodynamique pour aider à localiser l'emplacement du pont et l'orientation de ses piliers. Ce modèle pourrait avantageusement être utilisé pour aussi déterminer les caractéristiques de la section du chenal proposé et, en conséquence, minimiser la quantité initiale de dragage.

Bien que la méthode de dragage reste à être fixée en fonction de l'étude d'impact, nous favorisons un dragage par équipement terrestre et le dépôt des sédiments sur la plage à une distance minimale de 1 km de chaque côté du chenal. La période prévue pour la réalisation de ces travaux est de 6 mois pour un coût estimatif de 4 800 000 $. Si cela s'avérait approprié sur le plan environnemental, les travaux pourraient être effectués au cours de l'automne et de l'hiver.

Étant donné que les travaux de dragage du chenal et de sa protection seront réalisés après la construction du pont et de sa protection par le ministère des Transports du Québec, les quantités et les coûts pourront être mieux précisés une fois cette information connue. Il sera aussi requis de disposer d'informations plus précises sur les conditions du site du projet (relevés, forages...) et d'attendre les résultats de l'étude d'impact en ce qui concerne la disposition des sédiments dragués.

Une fois les travaux complétés, il sera nécessaire d'assurer un suivi du comportement des ouvrages. Dans l'éventualité où les ouvrages ne se comportaient pas tel que prévu, des correctifs devraient être apportés le plus rapidement possible.

RÉFÉRENCES

Anctil, F. et Ouellet, Y., 1988. "Analyse statistique des vents provenant de neuf stations météorologiques situées autour de l'estuaire et du golfe Saint-Laurent". Rapport GCS-88-02, Département de génie civil, Université Laval.

Barker, De Blois et Associés Inc., 1987. "Etude d'impact socio- économique sur la réouverture de la lagune du Havre-aux-Basques (Iles-de-la-Madeleine) dans la perspective d'une mise en valeur des ressources fauniques". Rapport présenté à Pêches et Océans Canada.

Brown, E.I., 1928. "Inlets on Sandy Coasts". Proceedings of the American Society of Civil Engineers, Vol. LIV, pp. 505-553.

Bruun P., 1978. "Stability of Tidal Inlets - Theory and Engineering". Developments in Geotechnical Engineering 23, Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam, 506 p.

Bruun P., 1981. "Port Engineering". Third Edition, Chapter 8, Gulf Publishing Company, Houston, Texas. 787 p.

Consultants Saint-Laurent, 1987. "Analyse des données du niveau d'eau de la lagune du Havre aux Basques". Rapport présenté à Pêches et Océans Canada, 46 p.

CSSA Consultants Ltée, 1986. "Transport de sédiments et relevés géophysiques aux Iles-de-la-Madeleine". Rapport soumis à Hydro-Québec, région Matapédia par les Consultants CSSA Ltée, 108 p. plus annexes.

Dean, R.G. and Walton, T.L. Jr., 1973. "Sediment Transport Processes in the Vicinity of Inlets with Special Reference to Sand Trapping". Proceedings of the International Research Federation Conference, Myrtle Beach, S.C.

Dimension Environnement Ltée, 1987. "Concept de mise en valeur des ressources fauniques de la lagune du Havre-aux-Basques (Iles-de-la-Madeleine)". Rapport présenté à Pêches et Océans Canada.

Drapeau, G. and Mercier, O., 1987. 11 Shoreline Erosion and Accretion Budget of Magdalen Islands, Gulf of St-Lawrence". Proc. Coastal Sedinents 1987, A.S.C.E., pp. 1321-1332.

Drapeau, G., 1988. "Stability of Tidal Inlets Navigation Channels and Adjacent Dredge Spoil Islands". Hydrodynamics and Sediment Dynamics of Tidal Inlets, D.G. Audrey editor, Springer-Verlag.

Dupuis, P. et Ouellet, Y., 1988. "Analyse des niveaux d'eaux extrêmes - Manuel d'utilisation". Rapport GCN-88-01, Département de génie civil, Université Laval, 53 p.

Dyer, K. R., 1973. "Estuaries: A Physical Introduction". John Wiley and Sons, Londres, 140 p.

Escoffier, F.F., 1977. "Hydraulics and Stability of Tidal Inlets". General Investigation of Tidal Inlet Report No. 13, U.S. Army Coastal Engineering Research Center, 72 p.

Forrester, W.D., 1983. "Manuel canadien des marées". Service hydrographique du Canada, Ministère des Pêches et Océans Canada, Ottawa, 148 p.

Galvin, C.J., Jr., 1971. "Inlets and Wave Direction, Wave Climate and Coastal Processes". Symposium on Water, Environment and Human Needs. Massachusetts Institute of Technology, pp. 44-78.

Jarret, J.T., 1976. "Tidal Prism-Inlet Area Relationships". General Investigation of Tidal Inlet Report no. 3, U.S. Army Coastal Engineering Research Center.

Johnson, J.W., 1973. "Characteristics and Behavior of Pacific Coast Tidal Inlets". Journal of the Waterways, Harbors and Coastal Engineering Division, ASCE, Vol. 99, no. WN3, Proc. Paper 9927, pp. 325-339.

Keulegan, G.H., 1967. "Tidal Flow in Entrances Water - Level Fluctuations of Basins in Communication with Seas". Technical Bulletin No. 14, Committee on Tidal Hydraulics, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, Miss.

Kieslich, J.M., 1981. "Tidal Inlet Response to Jetty Construction". General Investigation of Tidal Inlets, Report No. 19, U.S. Army Coastal Engineering Research Center.

King, D.B., 1974. "The Dynamics of Inlets and Bays". Technical Report 22, Coastal and Oceanographic Engineering Laboratory, University of Florida, Gainesville, Fla.

Larras, J., 1964. "Embouchures, estuaires, lagunes et deltas". Collection du Centre de Recherches et d'Essais de Chatou, Eyrolles, 171 p.

Mercier, O., 1987. "Modèle géomorphologique dynamique du littoral de l'archipel des Iles-de-la-Madeleine". Mémoire de maîtrise, Université du Québec à Rimouski, 336 p.

O'Brien, M.P., 1931. "Estuary Tidal Prisms Related to Entrance Areas". Civil Engineering, ASCE, Vol. 1, no. 8, pp. 738-739.

O'Brien, M.P., 1969. "Equilibrium Flow Areas of Tidal Inlets on Sandy Coasts". Journal of the Waterways and Harbors Division, ASCE, Vol. 95, No. WWI, Proc. Paper 6405, pp. 43-52.

O'Brien, M.P. and DEAN, R.G., 1972. "Hydraulics and Sedimentary Stability of Coastal Inlets". Proceedings of the 13th Coastal Engineering Conference, ASCE, pp. 761-780.

O'Brien, M.P. and CLARK, R.R., 1974. "Hydraulics Constants of Tidal Entrances". Proc. of the 14th Coastal Engineering Conference, ASCE, pp. 1546-1565.

Ouellet, Y. et Massé, B., 1978a. "Note complémentaire sur le transport littoral aux Iles-de-la-Madeleine". Rapport GCI-78-02, Département de Génie Civil, Université Laval, 54 p.

Ouellet Y. et Massé, B., 1978b. "REPORSI - Programme de calcul du transport littoral". Rapport GCT-78-04, Département de génie civil, Université Laval, 72 p.

Ouellet, Y., 1979. "Stabilité de l'entrée de la lagune de la Grande Entrée". Rapport GCN-79-01, Département de Génie Civil, Université Laval, 26 p.

Ouellet, Y., Desjardins, L. et Drouin, M., 1985. "Port de Millerand, Iles-de-la-Madeleine, étude numérique de la sédimentation". Rapport GCT-85-03 présenté au Ministère des Travaux Publics Canada. Département de génie civil, Université Laval, 88 p. + annexes.

Owens, E.H., 1976. "Process and Morphology Characteristics of Two Barrier Beaches in the Magdalen Islands, Gulf of St-Lawrence, Canada11. Proc. 15th Coastal Eng. Conference A.S.C.E., pp. 1975-1991.

Owens, E.H. and McCann, S.B., 1980. "The Coastal Geomorphology of the Magdalen Island". The Coastline of Canada, Mc Cann editor, The Geological Survey in Canada, Paper 80-10, pp. 51-72.

Paul, L.A., 1974. "Aspects of the coastal geomorphology of Iles-de-la-Madeleine using remote sensing techniques". B.A. Thesis, Department of Geography, McMaster University, Hamilton, 94 p.

Pêches et Océans Canada, 1989. "Tables des marées et courants du Canada". Volume 2, Golfe du Saint-Laurent, 41 p.

Seabergh, W.C., 1979. "Model Testing of Structures at a Tidal Inlet". Coastal Structures '79, ASCE, pp. 690-709.

Sogeam, 1985. "Etude de faisabilité de la réouverture de la lagune du Havre aux Basques aux Iles-de-la-Madeleine". Rapport présenté à Pêches et Océans Canada, 118 p.

Sorensen, R.M., 1978. "Procedures for Preliminary Analysis of Tidal Inlet Hydraulics and Stability". Coastal Engineering Technical Aid no. 77-8, Coastal Engineering Research Center.

U.S. Cerc, 1984. "Shore Protection Manual". Vol. I and II, Coastal Engineering Research Center, Department of the Army, Waterways Experiment Station, Corps of Engineers, Vicksburg, Mississippi.

Walton, T.L. and Adams, W.D., 1976. "Capacity of Inlet Outer Bars to Shore Sands". Proc. 14th Coastal Eng. Conf. ASCE.

FIGURES ET TABLEAUX

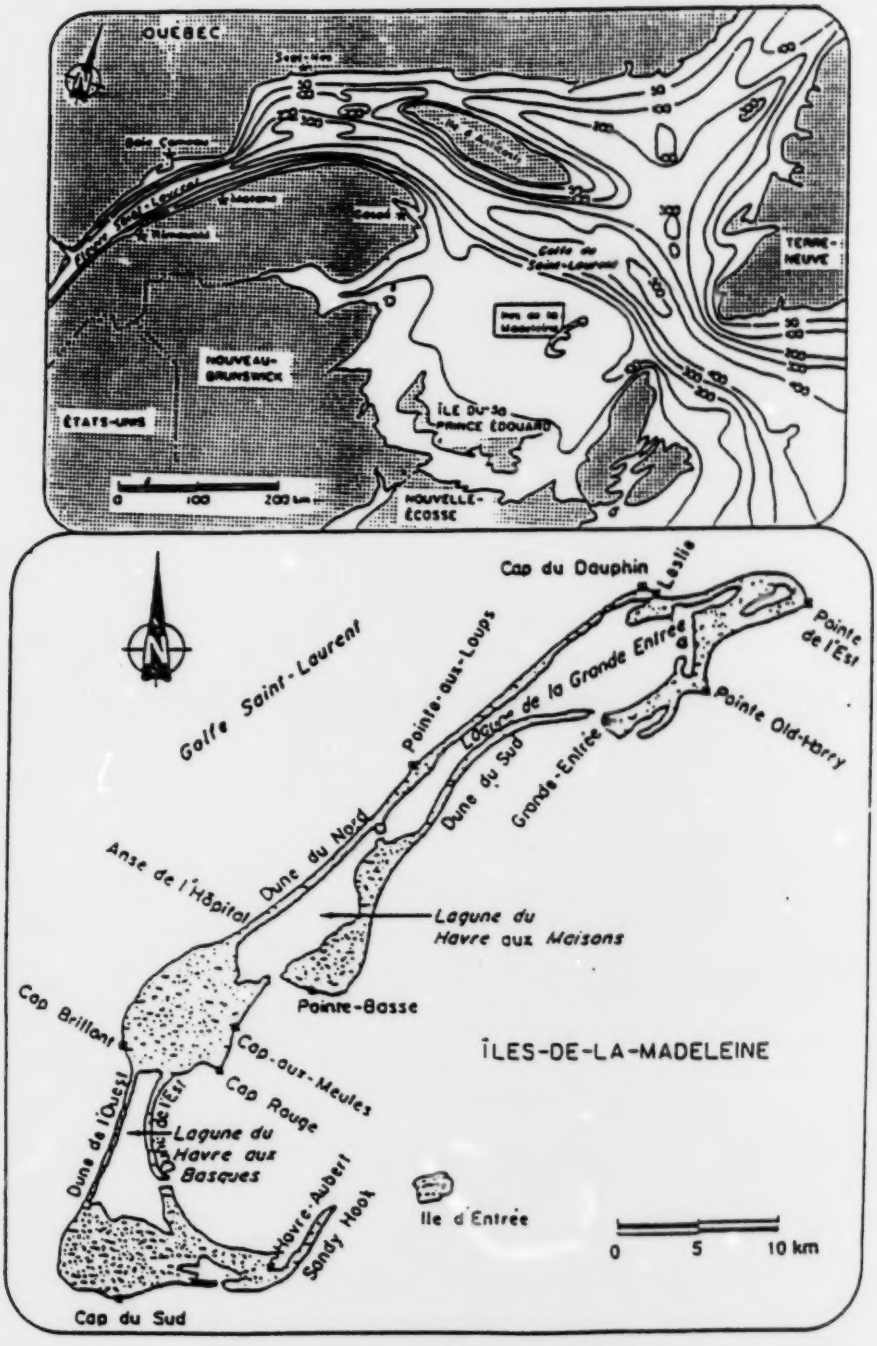


Fig. 1 -- Carte des Îles-de-la-Madeleine.

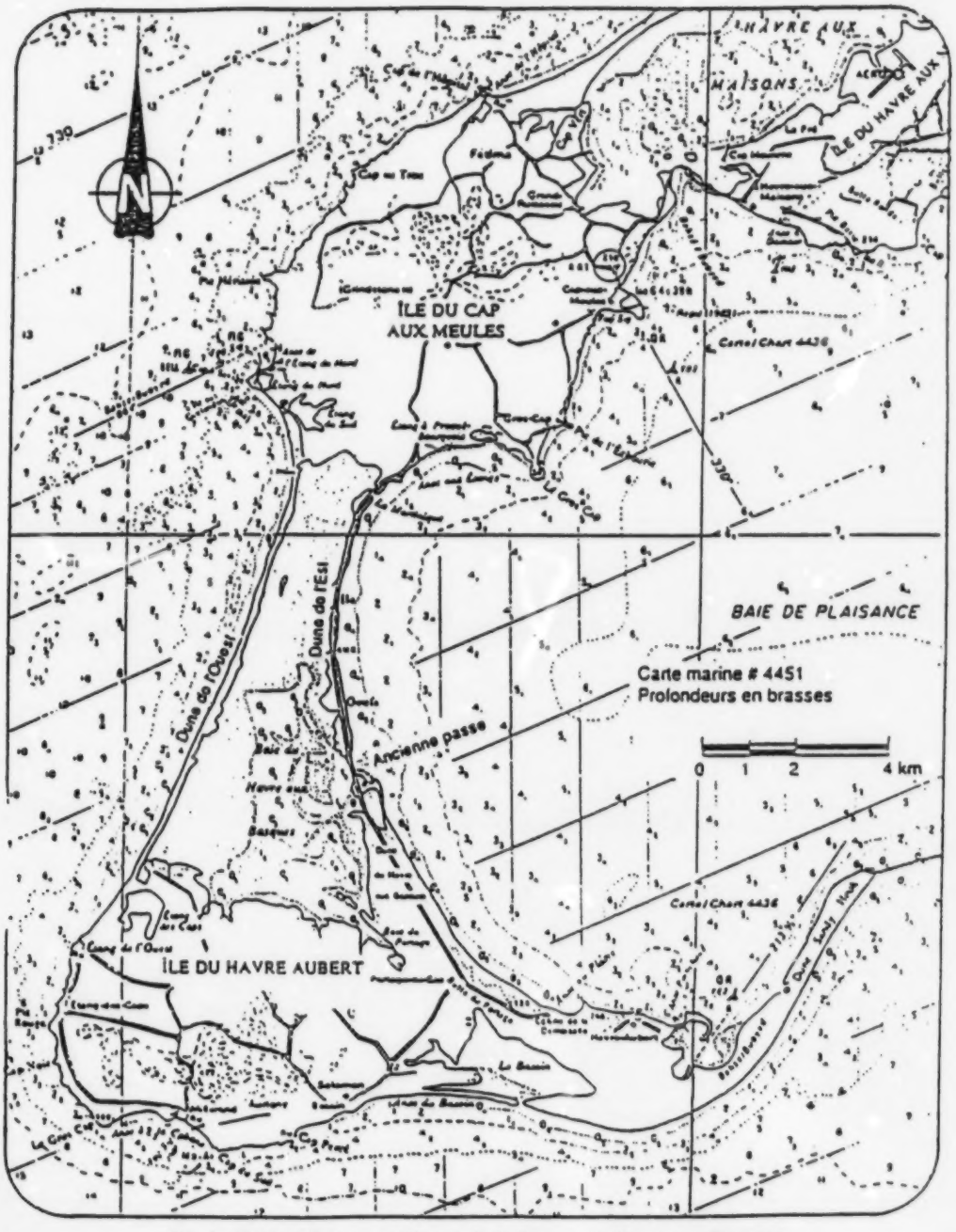


Fig. 2 - Bathymétrie au voisinage de la lagune du Havre aux Basques.

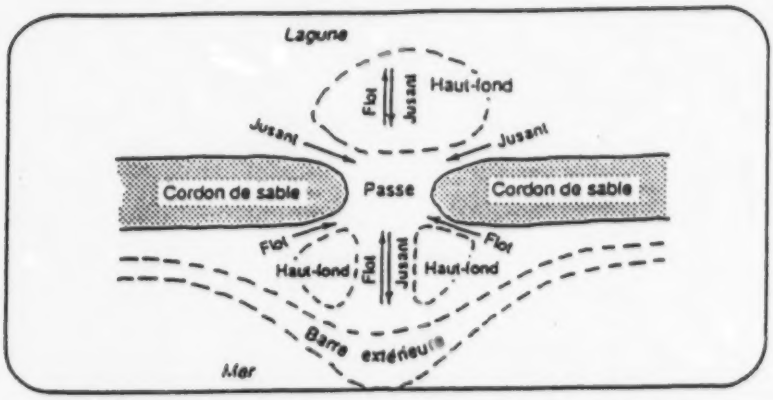


Fig. 3 -- Schéma typique de dépôts de part et d'autre d'une passe.

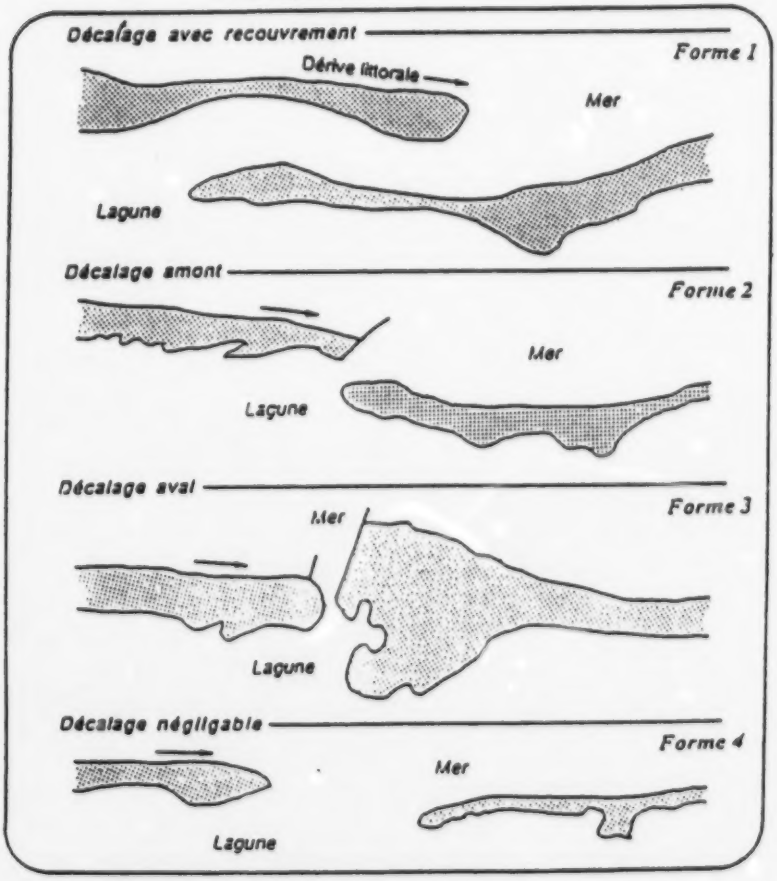


Fig. 4 -- Classification des formes de passe.

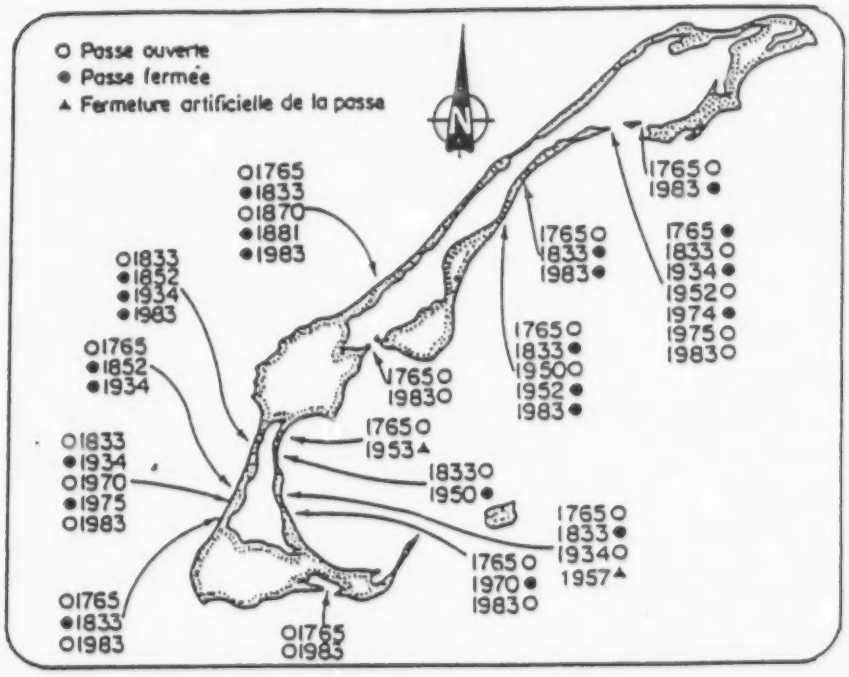


Fig. 5 -- Dynamique des passes aux Îles-de-la-Madeleine.

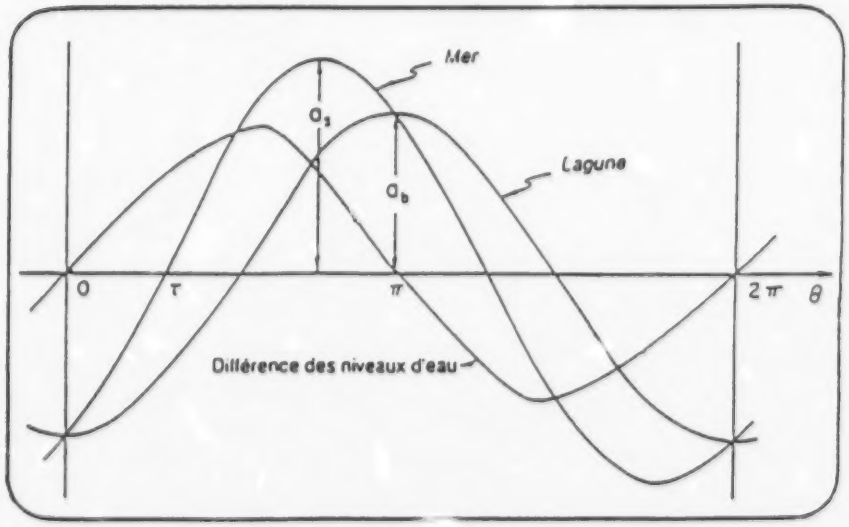


Fig. 6 -- Variation des niveaux d'eau de part et d'autre d'une passe.

TABLEAU 1. Calculs hydrauliques de la passe sur la dune de l'Est (avec B_c=200 m et L_c=500 m)

d_c (m)	0.7	1.0	2.0	3.0	4.0	5.0
A_c (m^2)	140	200	400	600	800	1000
R_h (m)	0.70	0.70	1.96	2.91	3.85	4.76
F	7.57	5.65	3.40	2.65	2.27	2.05
K_1	289.5	152.5	47.0	24.8	16.2	11.8
K_2	0.29	0.25	0.17	0.14	0.12	0.11
M	42.4	15.7	2.41	0.85	0.42	0.24
R	0.21	0.35	0.75	0.94	0.99	1.00
ε (°)	78.7	71.0	43.1	22.3	11.8	7.01
V_m (m/s)	1.24	1.40	1.52	1.27	1.00	0.81
$2a_b$ (m)	0.22	0.36	0.78	0.98	1.03	1.04
P_1 ($10^6 m^3$)	2.68	4.34	9.40	11.8	12.4	12.5

TABLEAU 2. Caractéristiques géométriques de la passe sur la dune de l'Ouest (L_c=368 m)

TRANSECT NO.	LARGEUR AU MIROIR (m)	DISTANCE DE LA CÔTE (m)	PROFONDEUR D'EAU (m)	AIRE MOUILLÉE (m^2)
1	62.0	60	0.23	14.1
2	65.5	100	0.35	22.9
3	41.5	185	0.47	19.3
4	42.0	215	0.51	21.4
5	67.5	275	0.30	20.1
6	50.5	375	0.51	25.6

TABLEAU 3. Calculs hydrauliques de la passe de la dune de l'Ouest

d_c (m)	0.3	0.4	0.5
A_c (m^2)	15	20	25
R_h (m)	0.30	0.39	0.49
F	10.55	8.24	6.84
K_1	5929	3462	2297
K_2	0.48	0.41	0.37
M	2281	999	530
R	0.03	0.04	0.06
ε (°)	88.7	87.8	86.9
V_m (m/s)	0.81	0.91	1.00
$2a_b$ (m)	0.02	0.03	0.04
P_1 ($10^6 m^3$)	0.37	0.56	0.77

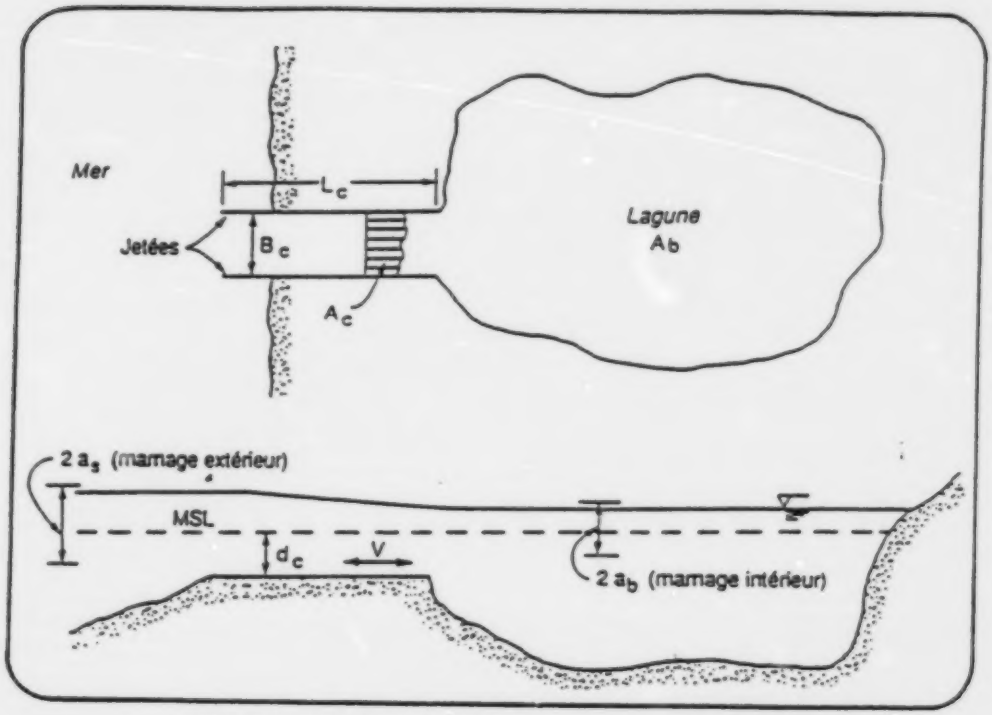


Fig. 7 -- Schéma de définition du système étudié.

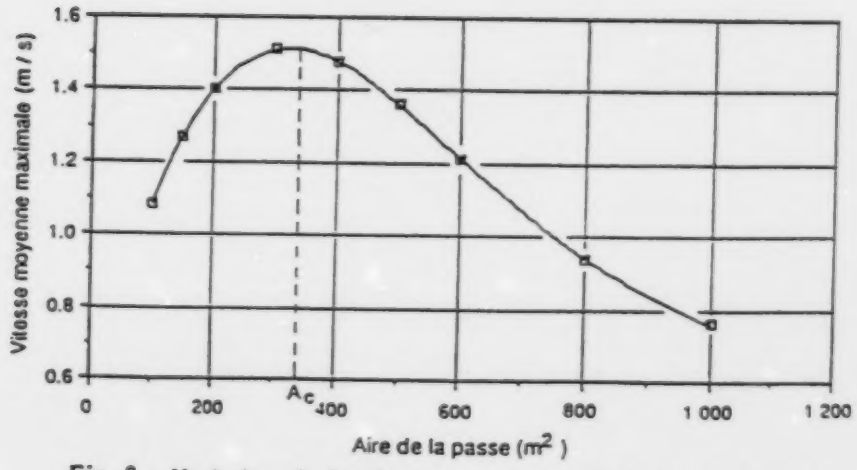


Fig. 8 - Variation de la vitesse moyenne maximale en fonction de l'aire mouillée de la passe sur la dune de l'Est.

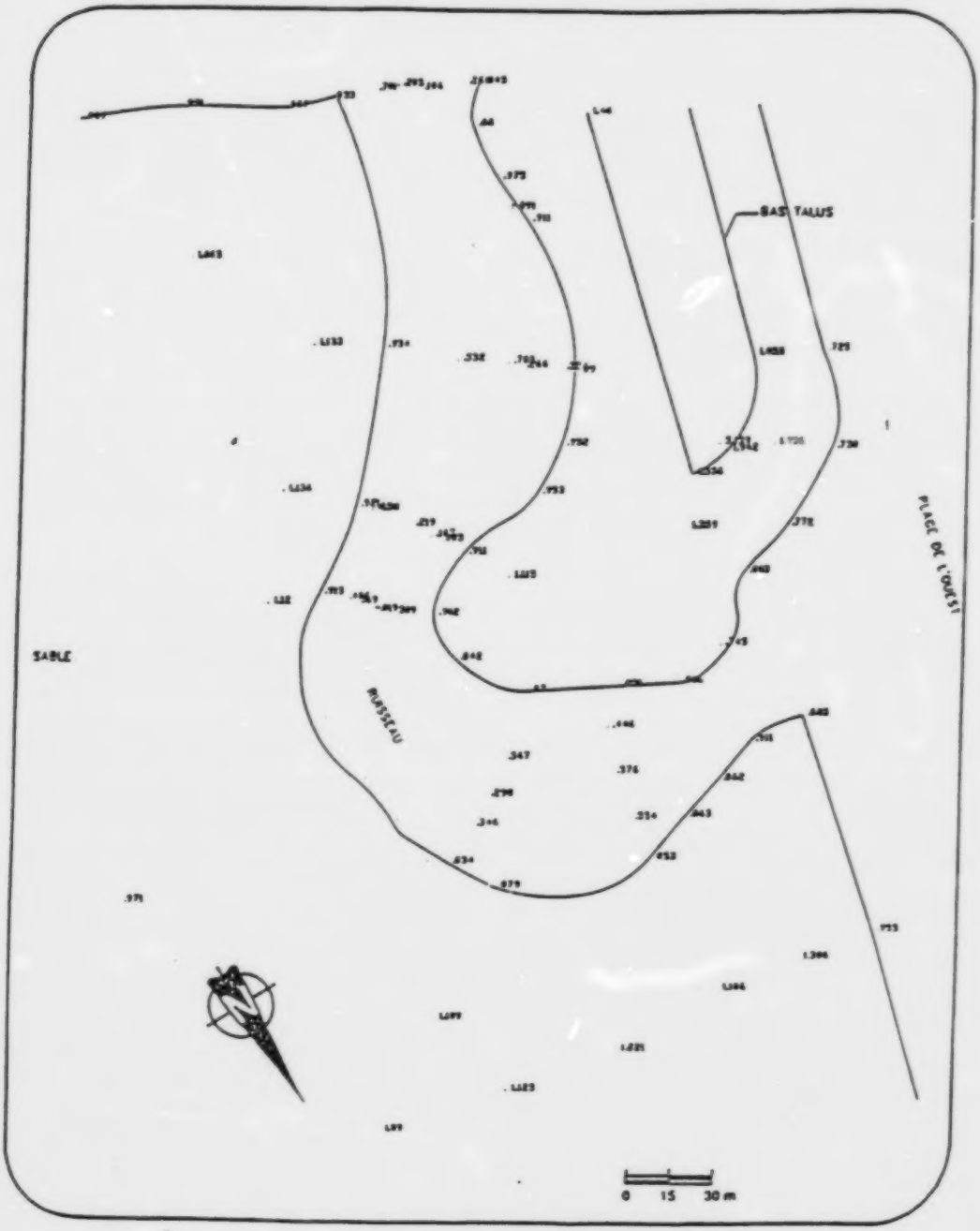
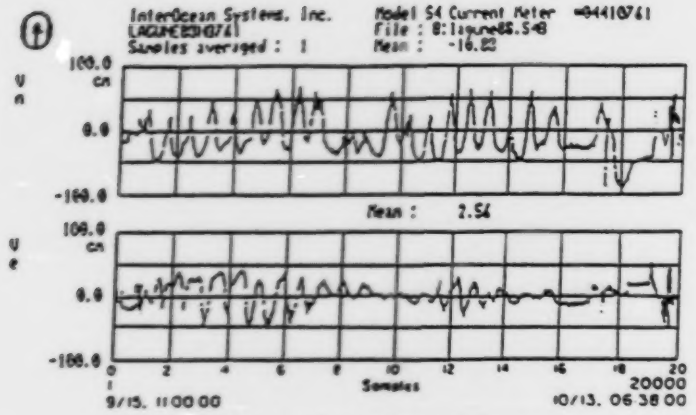
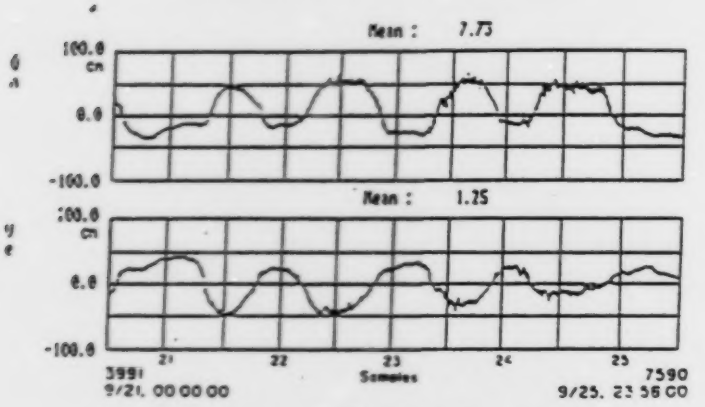


Fig. 9 - Relevé bathymétrique de la passe sur la dune de l'Est.



a) Composantes nord et est des courants.



b) Composantes lissées nord et est des courants.

c) Représentation polaire des courants.

Fig.10 - Résultats des mesures courantométriques dans la passe sur la dune de l'Ouest.

TABLEAU 4. Valeur de a et b de l'équation $A_c = a P_i^b$.

Cas	Types	a	b	Endroit
1	Deux jetées	$1,584 \times 10^{-4}$	0,95	Atlantique
2	Deux jetées	-	-	Golfe du Pacifique
3	Deux jetées	$1,015 \times 10^{-3}$	0,85	Pacifique
4	Une ou sans jetée	$2,261 \times 10^{-6}$	1,07	Atlantique
5	Une ou sans jetée	$6,992 \times 10^{-4}$	0,86	Golfe du Mexique
6	Une ou sans jetée	$8,950 \times 10^{-6}$	1,10	Pacifique
7	Toutes	$3,039 \times 10^{-5}$	1,05	Atlantique
8	Toutes	$9,311 \times 10^{-4}$	0,84	Golfe du Mexique
9	Toutes	$2,833 \times 10^{-4}$	0,91	Pacifique
10	Deux jetées	$7,490 \times 10^{-4}$	0,86	Général
11	Une ou sans jetée	$3,797 \times 10^{-5}$	1,03	Général
12	Toutes	$1,576 \times 10^{-4}$	0,95	Général
13	Deux jetées	$9,015 \times 10^{-4}$	0,85	Général
14	Une ou sans jetée	$6,560 \times 10^{-5}$	1,00	Général

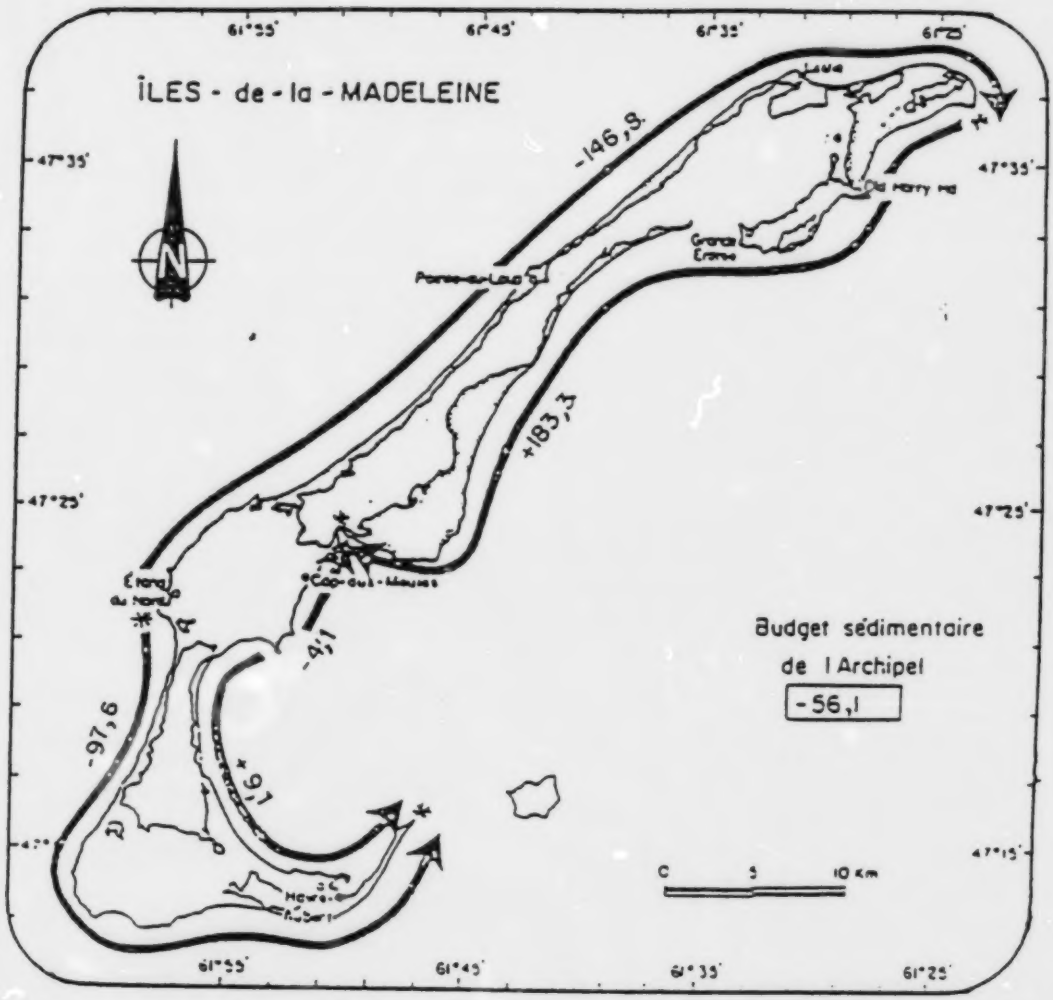


Fig. 11 - Dynamique sédimentaire de l'archipel des Îles-de-la-Madeleine.
Source : Mercier, 1987

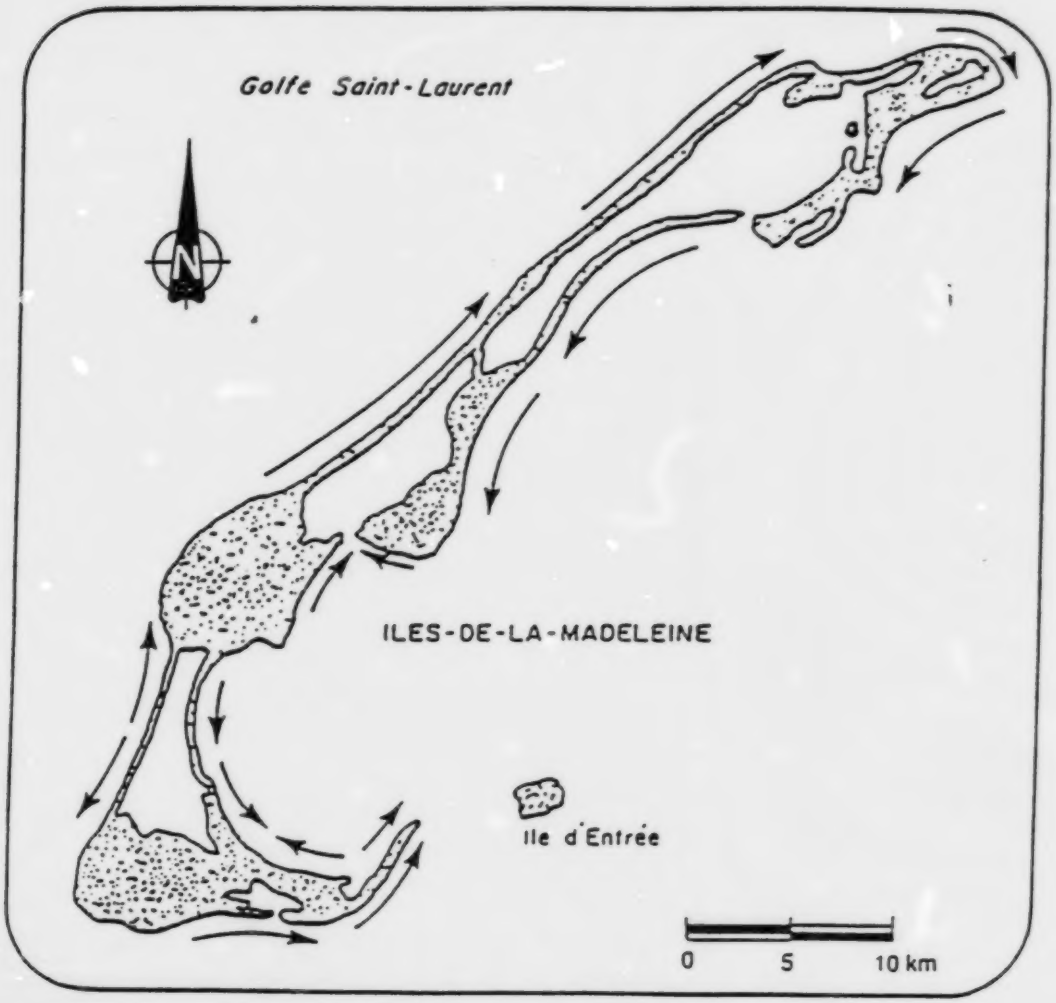


Fig. 12 - Évolution générale du transport littoral autour des Îles-de-la-Madeleine.
Source : Owens, 1976

TABLEAU 5. Évaluation de la dérive littorale

Unité (segment)	Cellule No	Volume total sur 14 ans (m^3)	Volume annuel (m^3)	Dérive littorale annuelle (m^3/a)
Gros Cap	Érosion rocheuse	- 20000	- 1429	+ 1429
IX (F)	407	- 2806	- 200	+ 1629
IX (G)	408	- 23460	- 1676	+ 3305
	409	- 59570	- 4255	+ 7560
	410	- 56834	- 4060	+ 11620
	411	- 4396	- 314	+ 11934
	412	- 45788	- 3270	+ 15204
	413	- 48160	- 3440	+ 18644
	414	- 22844	- 1632	+ 20276
X (A)	416	- 26163	- 1869	+ 22145
	417	- 67942	- 4853	+ 26098
	418	- 99500	- 7107	+ 34105
X (B)	419	+ 100133	+ 7152	+ 26953
	420	+ 60995	+ 4357	+ 22596
	421	+ 41382	+ 2956	+ 19640
	422	+ 82850	+ 5918	+ 13722
	423	+ 10768	+ 769	+ 12953
	424	+ 48221	+ 3444	+ 9509
	425	+ 100825	+ 7202	+ 2307
	426	+ 87025	+ 6216	- 3909
	427	+ 102952	+ 7354	- 11263
	428	+ 245707	+ 17551	- 28814
X (C)	429	+ 244160	+ 17440	- 46254
	430	- 79197	- 5657	- 40597
	431	+ 7036	+ 503	- 41100
	432	- 934	- 67	- 41033
	433	+ 19457	+ 1390	- 42423
	434	+ 1481	+ 106	- 42529

TABLEAU 6 - Élévation du niveau de l'eau aux échelles limnimétriques dans la lagune du Havre aux Basques (septembre-octobre 1988).

ÉCHELLE #1				ÉCHELLE #2			
DATE	HEURE (h:min)	HAUTEUR Niveau moyen (m)	HAUTEUR Zéro marégraphique (m)	DATE	HEURE (h:min)	HAUTEUR Niveau moyen (m)	HAUTEUR Zéro marégraphique (m)
18-09-88	16:09	0,30	1,05	20-09-88	10:05	0,29	1,04
20-09-88	17:00	0,29	1,04	20-09-88	16:25	0,29	1,04
21-09-88	09:45	0,28	1,03	23-09-88	09:30	0,38	1,13
22-09-88	16:20	0,30	1,05	26-09-88	16:06	0,33	1,08
23-09-88	09:12	0,37	1,12	29-09-88	07:56	0,33	1,08
26-09-88	11:14	0,33	1,08	30-09-88	10:44	0,28	1,03
27-09-88	10:40	0,33	1,08	30-09-88	16:30	0,29	1,04
29-09-88	08:00	0,31	1,06	01-10-88	09:30	0,27	1,02
29-09-88	15:19	0,31	1,06	01-10-88	15:15	0,27	1,02
30-09-88	10:50	0,28	1,03	02-10-88	09:00	0,28	1,03
30-09-88	16:35	0,29	1,04	02-10-88	16:10	0,27	1,02
01-10-88	09:36	0,27	1,02	03-10-88	09:00	0,26	1,01
01-10-88	15:20	0,27	1,02	09-10-88	10:25	0,27	1,02
02-10-88	09:10	0,28	1,03	10-10-88	10:25	0,30	1,05
02-10-88	16:18	0,27	1,02				
03-10-88	09:05	0,26	1,01				
06-10-88	17:35	0,33	1,08				
07-10-88	16:08	0,31	1,06				
09-10-88	10:32	0,27	1,02				
10-10-88	10:15	0,30	1,05				

Note: Le niveau moyen de l'eau (ou niveau moyen de la mer) est de 0,75 m au-dessus du zéro marégraphique

TABLEAU 7. Hauteurs et heures mesurées de la marée à Cap-aux-Meules

Septembre et octobre 1988								
Date	Heure (h:min)	Haut. (m)	Heure (h:min)	Haut. (m)	Heure (h:min)	Haut. (m)	Heure (h:min)	Haut. (m)
23/9/88	01:20	0.82	06:45	1.04	13:50	0.34	21:20	1.14
24/9/88	01:40	0.78	07:25	1.22	14:30	0.40	21:00	0.98
25/9/88	01:45	0.48	08:30	1.08	15:25	0.30	21:40	1.06
26/9/88	02:45	0.44	09:25	1.22	15:40	0.48		
27/9/88							22:10	1.10
28/9/88	04:20	0.26	11:30	1.24	16:40	0.64	22:35	1.22
29/9/88	05:15	0.32	11:05	1.16	17:30	0.54	22:40	1.00
30/9/88	05:45	0.24	14:30	1.08	18:15	0.70	23:55	1.02
1/10/88	06:30	0.28	14:30	1.10	19:10	0.90		
2/10/88	00:35	1.10	07:50	0.36			19:20	0.98
3/10/88	01:10	1.18	09:00	0.58	16:25	1.08	22:15	0.98
4/10/88	03:05	1.04	11:00	0.48	19:40	1.04		
5/10/88	00:05	0.92	00:45	1.10				
6/10/88					13:40	0.40	19:40	0.98
7/10/88	01:05	0 76	06:05	1.02	14:25	1.48	20:20	0.84
8/10/88	01:25	0.54	07:55	0.98	14:25	0.46	21:55	1.04
9/10/88	03:15	0.76	09:25	1.30	14:25	0.76	21:30	1.02
10/10/88	03:50	0.28	09:45	0.92	15:30	0.52		

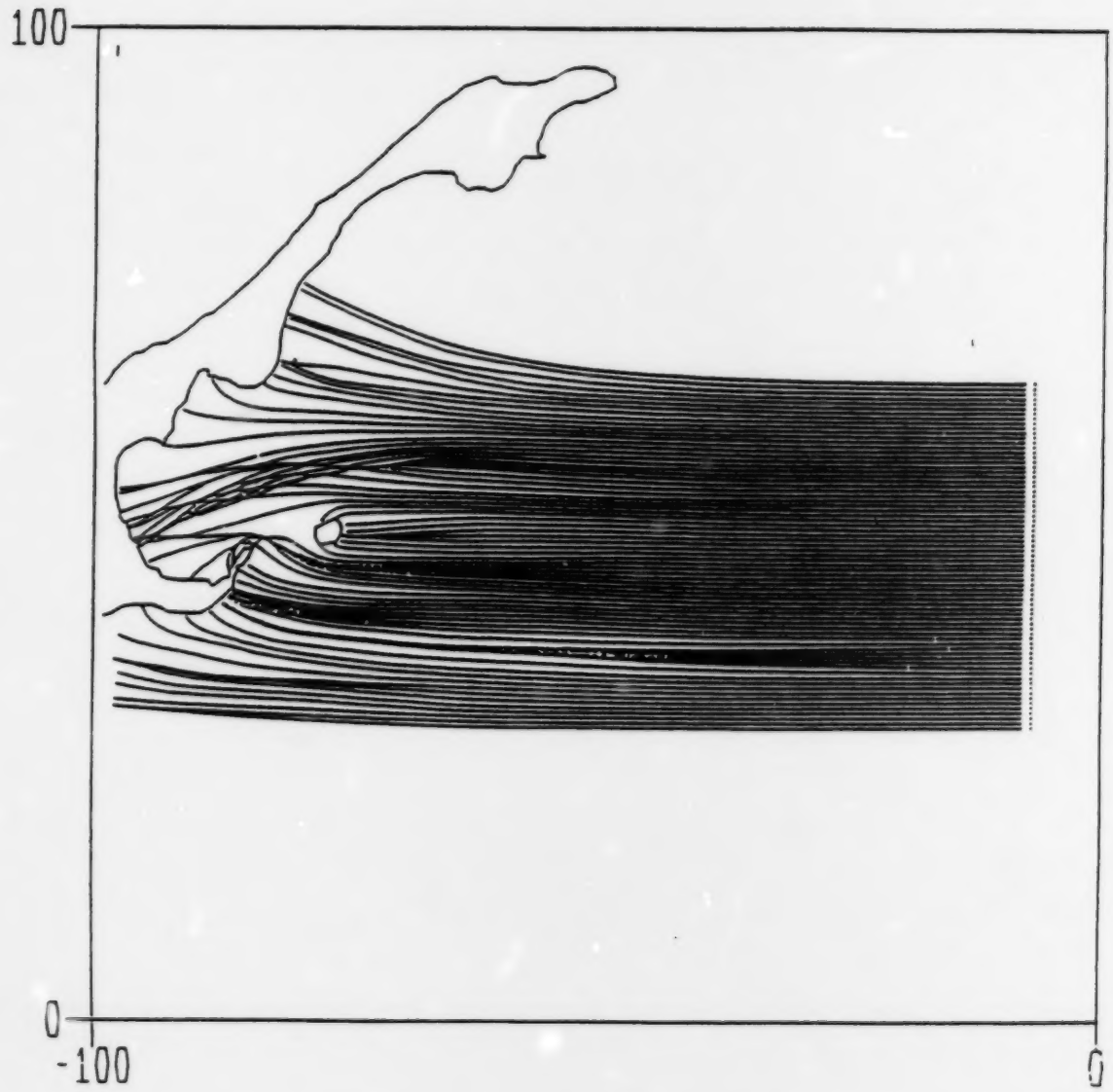


Figure 13 - Direction est, période 9 secondes.

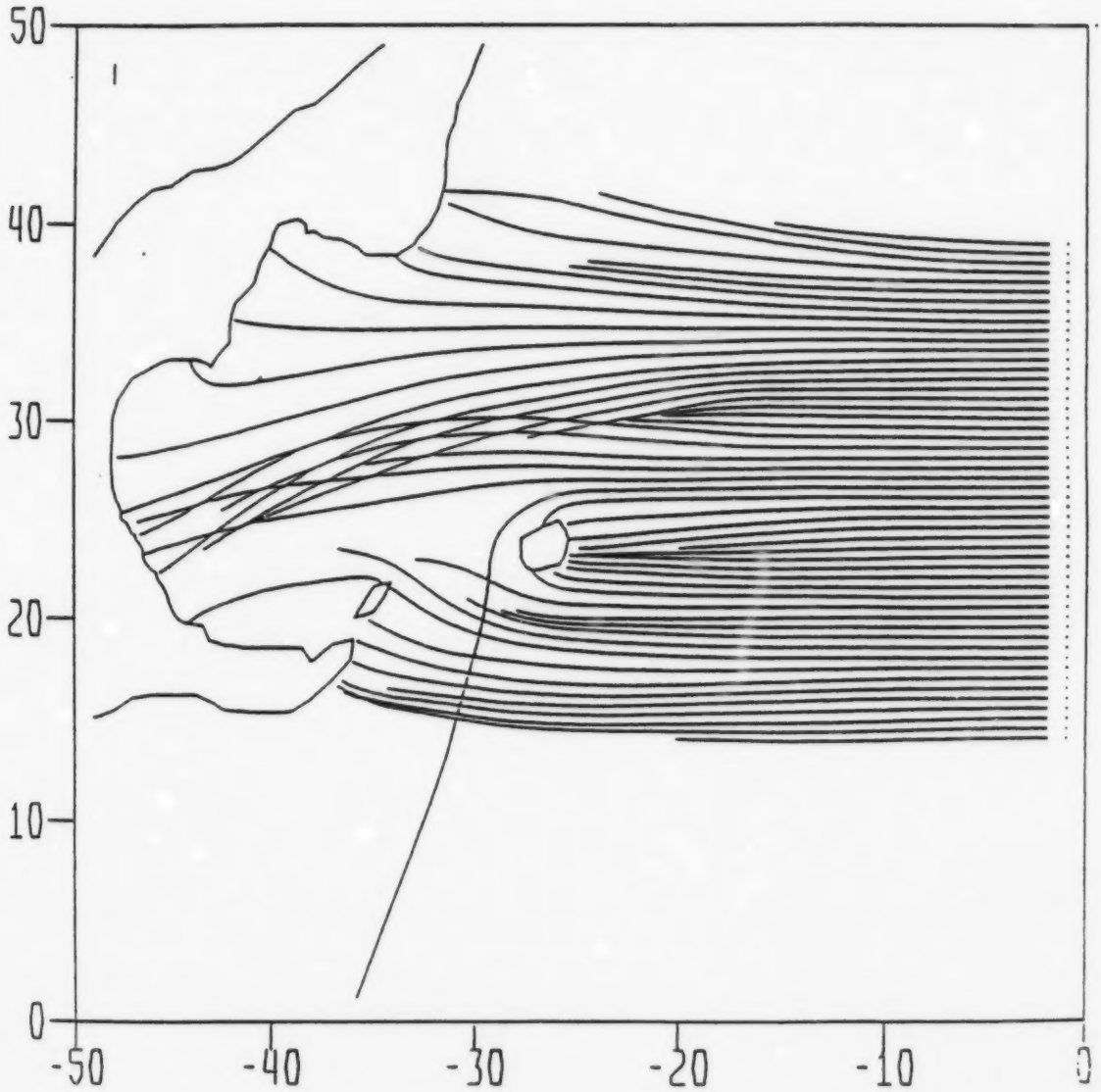
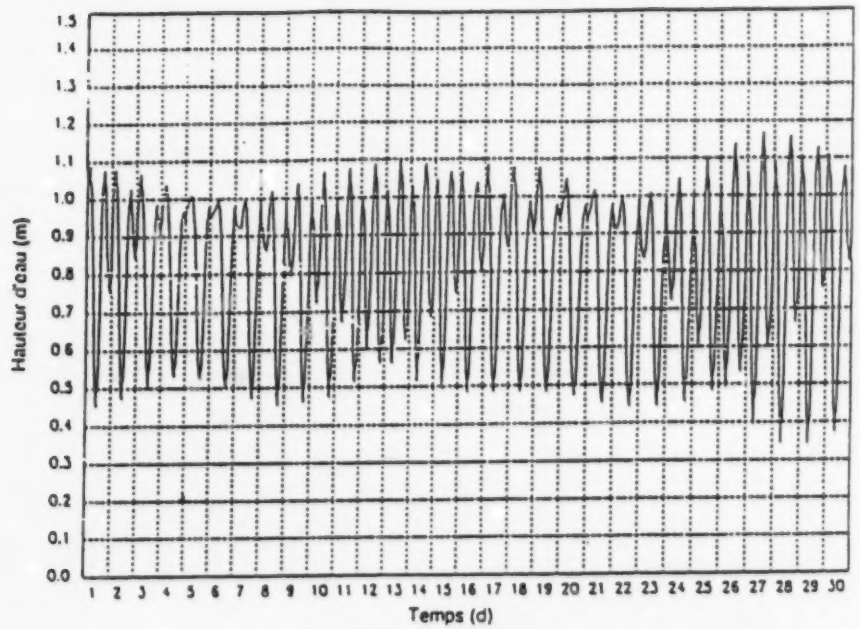
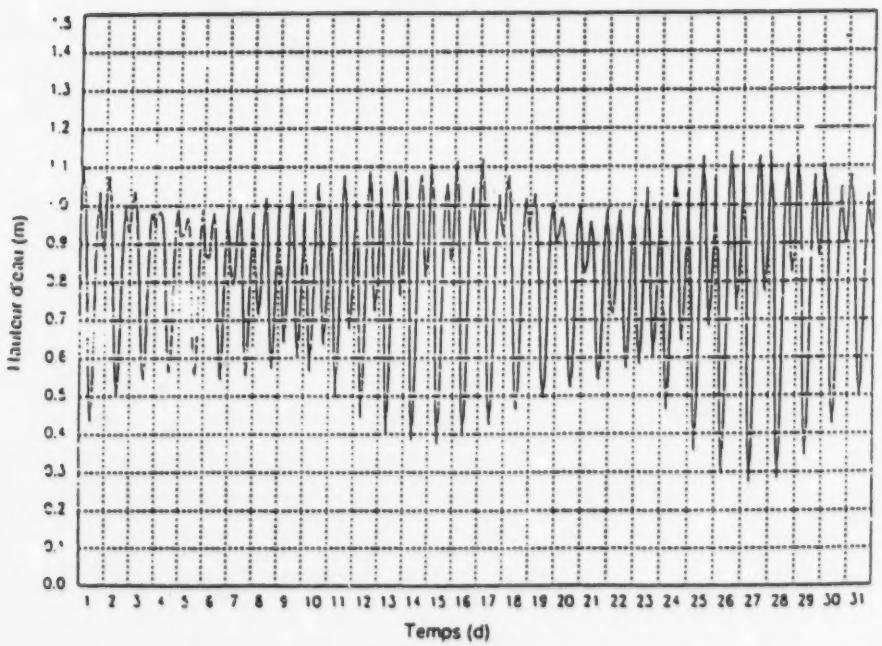


Figure 14 - Direction est, période 9 secondes.

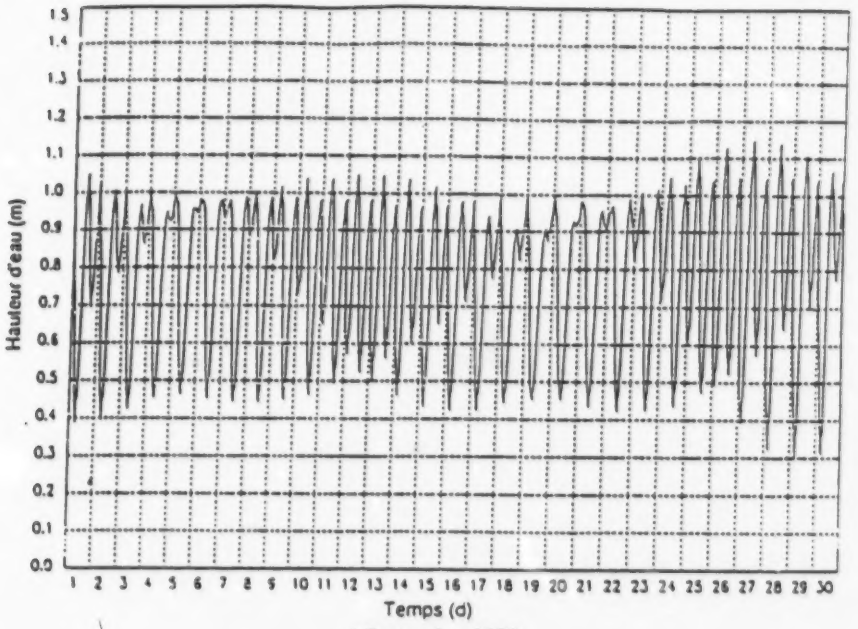


a) Septembre 1988.

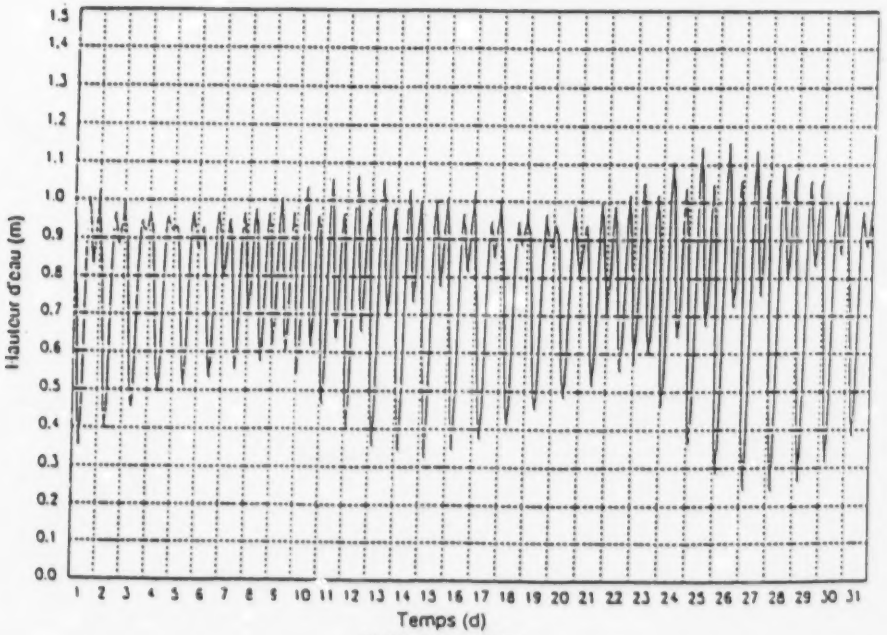


b) Octobre 1988.

Figure 15 - Courbes de la marée prédite à Cap-aux-Meules, station 1970

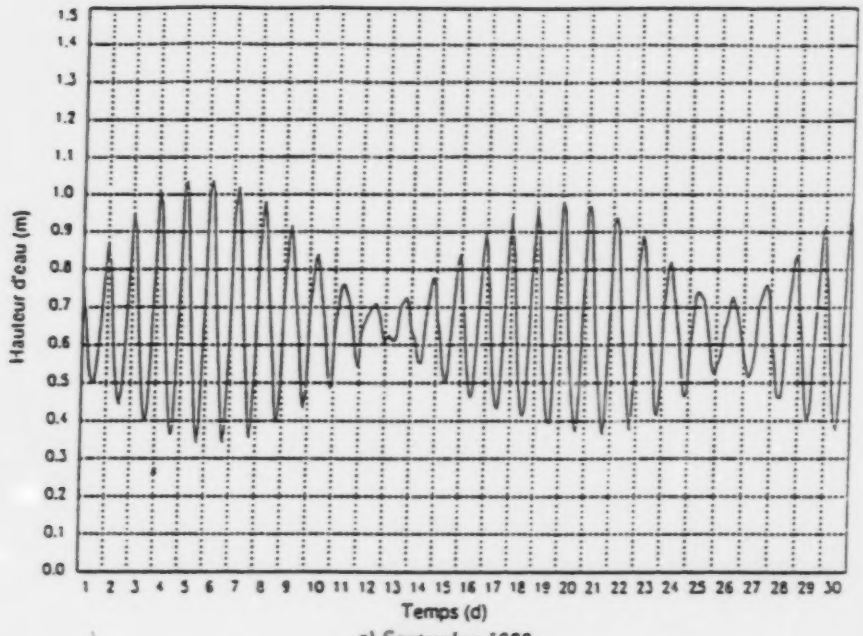


a) Septembre 1988.

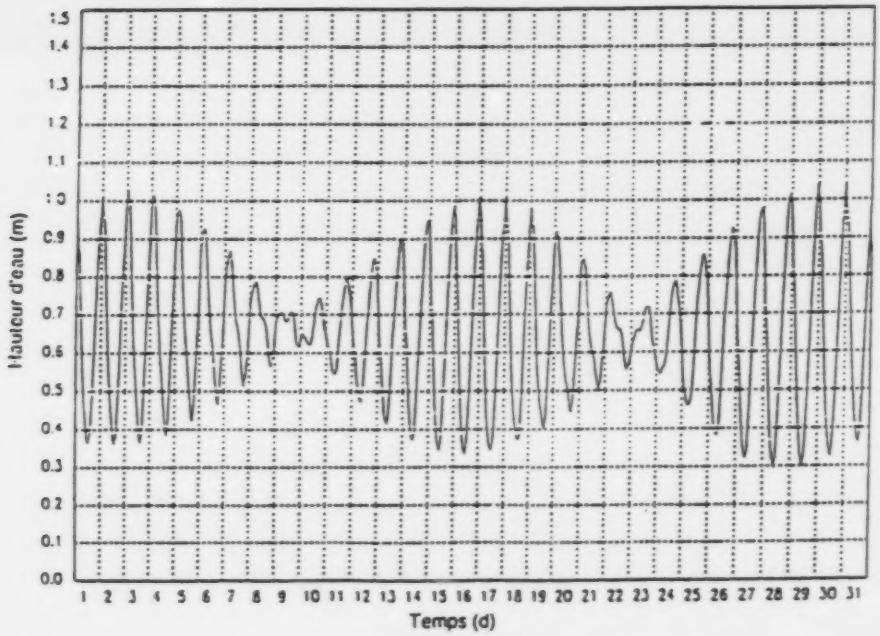


b) Octobre 1988.

Figure 16 - Courbes de la marée prédite à Havre-Aubert, station 1964

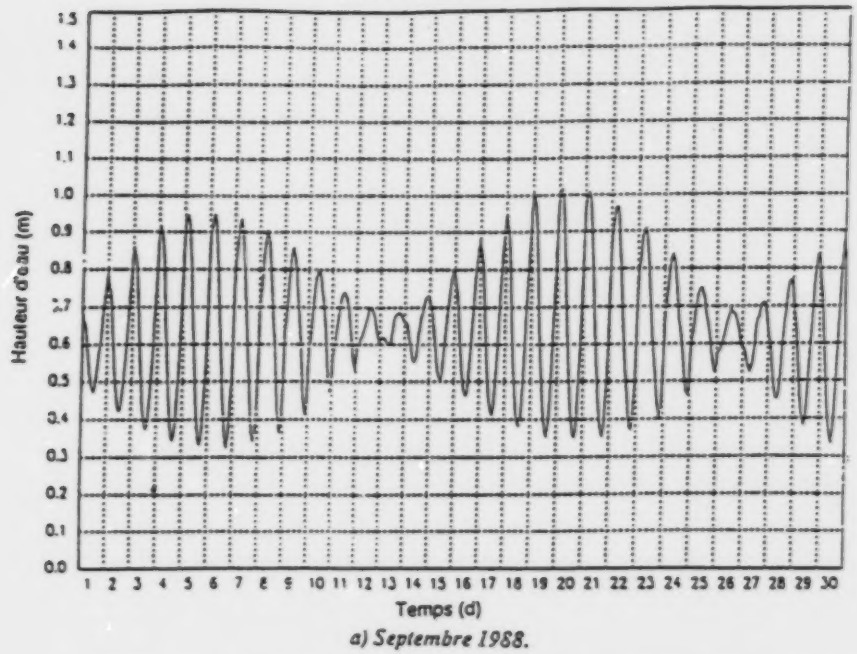


a) Septembre 1988.

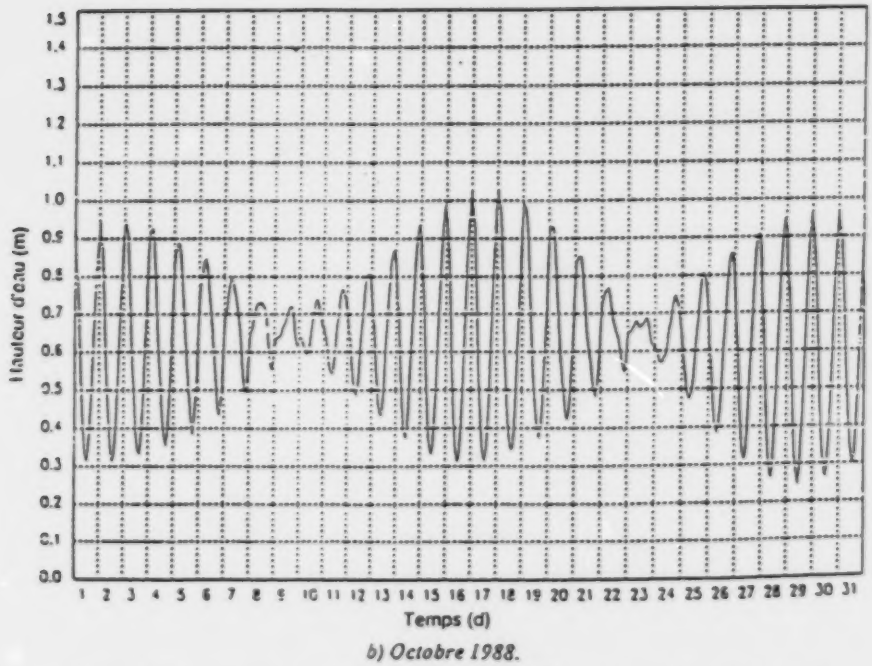


b) Octobre 1988.

Figure 17 – Courbes de la marée prédite à l'Étang-du-Nord, station 1990



a) Septembre 1988.



b) Octobre 1988.

Figure 18 – Courbes de la marée prédite à l'Étang-du-Nord, station 1991.

TABLEAU 8a) - Hauteurs et heures prédites de la marée à Cap-aux-Meules, station 1970

Septembre 1988

Date	Heure (h:min)	Haut. (m)	Heure (h:min)	Haut. (m)	Heure (h:min)	Haut. (m)	Heure (h:min)	Haut. (h)
1/ 9/88	03:10	1.10	09:30	0.44	16:55	1.08	22:00	0.75
2/ 9/88	03:25	1.09	10:30	0.47	18:20	1.03	22:25	0.83
3/ 9/88	04:05	1.07	11:55	0.50	19:40	0.99	23:15	0.90
4/ 9/88	04:40	1.05	13:15	0.52	21:15	0.97		
5/ 9/88	00:15	0.94	05:45	1.01	14:55	0.52	22:55	0.98
6/ 9/88	01:45	0.95	05:15	0.97	07:40	1.00	16:30	0.49
7/ 9/88	00:05	0.99	05:30	0.92	09:25	1.00	17:15	0.46
8/ 9/88	00:10	0.99	05:25	0.86	10:40	1.03	17:55	0.45
9/ 9/88	00:30	0.99	05:25	0.79	11:25	1.05	18:30	0.45
10/ 9/88	00:55	1.00	06:00	0.72	12:05	1.07	18:55	0.47
11/ 9/88	01:15	1.00	06:25	0.66	12:35	1.08	19:15	0.51
12/ 9/88	01:30	1.01	07:00	0.60	13:15	1.10	19:45	0.56
13/ 9/88	01:45	1.02	07:25	0.55	13:45	1.10	20:15	0.61
14/ 9/88	02:00	1.03	08:05	0.51	14:25	1.10	20:30	0.68
15/ 9/88	02:15	1.06	08:30	0.49	15:20	1.07	21:05	0.74
16/ 9/88	02:45	1.07	09:20	0.48	16:38	1.04	21:15	0.80
17/ 9/88	03:05	1.09	10:10	0.48	18:05	1.01	21:55	0.86
18/ 9/88	03:30	1.09	11:15	0.48	19:20	0.99	22:20	0.90
19/ 9/88	04:05	1.09	12:30	0.48	20:30	0.98	23:15	0.93
20/ 9/88	04:50	1.05	13:45	0.47	21:40	0.98		
21/ 9/88	00:45	0.94	06:10	1.02	14:55	0.45	22:45	0.99
22/ 9/88	02:25	0.90	07:50	1.00	16:00	0.44	23:15	0.99
23/ 9/88	04:00	0.83	09:25	1.01	16:55	0.44	23:50	1.00
24/ 9/88	05:00	0.72	10:50	1.05	17:40	0.45		
25/ 9/88	00:10	1.01	05:45	0.60	11:55	1.10	18:20	0.48
26/ 9/88	00:30	1.03	06:20	0.48	12:45	1.14	19:05	0.53
27/ 9/88	01:00	1.06	07:00	0.39	13:45	1.17	19:25	0.59
28/ 9/88	01:15	1.09	07:45	0.34	14:30	1.17	20:10	0.66
29/ 9/88	01:55	1.11	08:25	0.33	15:40	1.13	20:45	0.75
30/ 9/88	02:20	1.12	09:15	0.37	17:00	1.08	21:20	0.82

TABLEAU 8b) - Hauteurs et heures prédites de la marée à Cap-aux-Meules, station 1970

Octobre 1988

Date	Heure (h:min)	Haut. (m)	Heure (h:min)	Haut. (m)	Heure (h:min)	Haut. (m)	Heure (h:min)	Haut. (h)
1/10/88	02:50	1.11	10:15	0.43	18:10	1.04	22:00	0.88
2/10/88	03:20	1.08	11:40	0.50	19:20	1.00	22:45	0.93
3/10/88	03:55	1.04	13:05	0.54	20:45	0.99		
4/10/88	00:30	0.94	04:50	0.99	14:25	0.55	22:00	0.99
5/10/88	02:05	0.92	08:05	0.97	15:45	0.55	22:30	0.99
6/10/88	04:45	0.86	09:40	0.99	16:45	0.54	23:05	0.99
7/10/88	04:45	0.79	10:30	1.00	17:20	0.55	23:30	0.99
8/10/88	05:05	0.71	11:20	1.03	17:55	0.57	23:55	0.99
9/10/88	05:30	0.63	12:00	1.05	18:20	0.59		
10/10/88	00:15	0.99	06:05	0.56	12:35	1.06	18:45	0.63
11/10/88	00:30	1.00	06:30	0.50	13:20	1.08	19:15	0.67
12/10/88	00:50	1.01	07:05	0.44	14:00	1.09	19:45	0.72
13/10/88	01:10	1.05	07:45	0.40	14:30	1.10	20:05	0.76
14/10/88	01:30	1.08	08:15	0.37	15:30	1.08	20:25	0.80
15/10/88	02:00	1.11	08:55	0.37	16:50	1.07	20:55	0.85
16/10/88	02:30	1.13	09:30	0.38	17:55	1.05	21:20	0.89
17/10/88	03:00	1.12	10:30	0.42	19:00	1.03	22:10	0.92
18/10/88	03:45	1.09	11:55	0.45	20:05	1.02	23:20	0.93
19/10/88	04:30	1.03	13:10	0.49	21:00	1.01		
20/10/88	01:15	0.90	06:05	0.97	14:20	0.51	21:50	1.00
21/10/88	02:55	0.82	08:15	0.96	15:30	0.54	22:25	0.99
22/10/88	03:55	0.71	10:00	0.99	16:30	0.57	22:50	1.00
23/10/88	04:45	0.58	11:10	1.05	17:15	0.60	23:10	1.01
24/10/88	05:20	0.46	12:05	1.10	17:55	0.64	23:30	1.04
25/10/88	06:00	0.35	13:00	1.13	18:25	0.67		
26/10/88	00:05	1.08	06:45	0.28	13:45	1.14	19:05	0.72
27/10/88	00:35	1.11	07:15	0.26	14:45	1.13	19:30	0.77
28/10/88	01:10	1.13	08:10	0.28	15:55	1.11	20:15	0.82
29/10/88	02:00	1.13	09:05	0.34	17:00	1.08	20:55	0.86
30/10/88	02:15	1.11	10:10	0.42	18:00	1.05	21:30	0.90
31/10/88	03:00	1.08	11:30	0.49	19:00	1.03		

TABLEAU 9a) - Hauteurs et heures prédites de la marée à Havre-Aubert (Amherst), station 1964

Septembre 1988

Date	Heure (h:min)	Haut. (m)	Heure (h:min)	Haut. (m)	Heure (h:min)	Haut. (m)	Heure (h:min)	Haut. (h)
1/ 9/88	05:55	0.38	12:55	1.05	18:15	0.69	23:55	1.02
2/ 9/88	06:50	0.39	14:10	1.01	18:55	0.78		
3/ 9/88	00:15	1.01	07:55	0.42	15:40	0.97	19:30	0.86
4/ 9/88	00:50	1.01	09:15	0.45	17:15	0.96	20:20	0.91
5/ 9/88	01:30	0.99	10:40	0.46	19:05	0.96	22:00	0.94
6/ 9/88	03:00	0.98	12:00	0.45	20:10	0.98		
7/ 9/88	00:00	0.93	04:55	0.98	13:05	0.44	20:30	0.99
8/ 9/88	01:10	0.88	06:10	1.00	13:50	0.44	20:55	0.99
9/ 9/88	01:30	0.91	07:10	1.02	14:25	0.44	21:10	0.99
10/ 9/88	02:15	0.73	08:00	1.04	14:55	0.46	21:25	0.99
11/ 9/88	02:50	0.65	08:45	1.05	15:25	0.49	21:40	0.98
12/ 9/88	03:20	0.57	09:25	1.05	15:55	0.52	21:55	0.98
13/ 9/88	03:50	0.50	10:05	1.05	16:20	0.55	22:10	0.97
14/ 9/88	04:25	0.46	10:50	1.04	16:45	0.60	22:25	0.97
15/ 9/88	04:55	0.43	11:30	1.02	17:10	0.65	22:50	0.97
16/ 9/88	05:30	0.42	12:25	0.99	17:30	0.71	23:10	0.98
17/ 9/88	06:15	0.42	13:30	0.94	18:00	0.77	23:40	0.99
18/ 9/88	07:15	0.44	15:05	0.91	18:25	0.82		
19/ 9/88	00:00	1.00	08:35	0.45	16:45	0.91	19:00	0.87
20/ 9/88	00:45	1.00	10:05	0.45	18:00	0.93	20:05	0.91
21/ 9/88	01:50	0.98	11:25	0.43	18:55	0.96	23:15	0.90
22/ 9/88	04:10	0.97	12:25	0.42	19:25	0.99		
23/ 9/88	00:30	0.82	05:55	1.01	13:15	0.41	20:00	1.02
24/ 9/88	01:20	0.72	07:05	1.05	14:00	0.43	20:25	1.03
25/ 9/88	02:00	0.60	08:10	1.10	14:40	0.47	20:50	1.04
26/ 9/88	02:35	0.48	09:05	1.14	15:15	0.51	21:15	1.05
27/ 9/88	03:20	0.39	10:00	1.15	16:00	0.57	21:45	1.05
28/ 9/88	04:00	0.32	10:55	1.15	16:30	0.64	22:05	1.05
29/ 9/88	04:45	0.29	11:50	1.11	17:15	0.70	22:35	1.04
30/ 9/88	05:30	0.30	12:50	1.07	17:50	0.77	23:05	1.04

TABLEAU 9b) - Hauteurs et heures prédites de la marée à Havre-Aubert (Amherst), station 1964

Octobre 1988

Date	Heure (h:min)	Haut. (m)	Heure (h:min)	Haut. (m)	Heure (h:min)	Haut. (m)	Heure (h:min)	Haut. (h)
1/10/88	06:25	0.34	14:05	1.01	18:25	0.83	23:40	1.03
2/10/88	07:30	0.39	15:25	0.97	19:05	0.88		
3/10/88	00:05	1.00	09:00	0.45	16:55	0.95	20:05	0.92
4/10/88	00:45	0.97	10:15	0.48	18:20	0.96	22:20	0.92
5/10/88	02:30	0.93	11:25	0.51	19:10	0.97		
6/10/88	00:20	0.87	05:05	0.93	12:30	0.53	19:30	0.97
7/10/88	00:55	0.80	06:20	0.95	13:15	0.55	19:50	0.97
8/10/88	01:15	0.71	07:15	0.98	13:45	0.57	20:05	0.97
9/10/88	01:50	0.62	08:00	1.01	14:20	0.59	20:20	0.97
10/10/88	02:20	0.54	08:40	1.04	14:45	0.61	20:35	0.97
11/10/88	02:50	0.46	09:20	1.06	15:20	0.63	20:50	0.97
12/10/88	03:20	0.40	10:00	1.07	15:45	0.65	21:10	0.98
13/10/88	03:55	0.35	10:45	1.06	16:15	0.68	21:40	0.99
14/10/88	04:25	0.33	11:30	1.04	16:45	0.72	22:00	1.00
15/10/88	05:10	0.32	12:25	1.00	17:05	0.76	22:30	1.01
16/10/88	05:55	0.34	13:40	0.97	17:30	0.81	23:00	1.02
17/10/88	06:55	0.37	14:55	0.95	18:15	0.85	23:45	1.01
18/10/88	08:05	0.41	16:10	0.95	19:15	0.88		
19/10/88	00:40	0.98	09:30	0.44	17:10	0.97	21:35	0.88
20/10/88	02:10	0.94	10:45	0.48	17:55	0.99	23:25	0.80
21/10/88	04:45	0.94	11:50	0.51	18:30	1.00		
22/10/88	00:15	0.69	06:15	0.99	12:45	0.55	19:00	1.02
23/10/88	01:00	0.58	07:20	1.06	13:30	0.59	19:25	1.03
24/10/88	01:45	0.46	08:20	1.11	14:20	0.63	19:50	1.04
25/10/88	02:20	0.36	09:15	1.15	15:00	0.67	20:20	1.05
26/10/88	03:00	0.28	10:05	1.16	15:30	0.71	20:50	1.06
27/10/88	03:40	0.24	10:55	1.14	16:10	0.75	21:25	1.07
28/10/88	04:25	0.23	11:50	1.11	16:45	0.79	21:55	1.07
29/10/88	05:15	0.26	12:50	1.06	17:15	0.83	22:30	1.05
30/10/88	06:10	0.31	13:55	1.01	18:05	0.86	23:05	1.03
31/10/88	07:15	0.38	15:05	0.98	18:55	0.88		

TABLEAU 10 Statistiques des hauteurs de la marée à Cap-aux-Meules pour l'année 1988
(répartition par classe de 0,1 m)

1988 1988		8784		8784		0					
Hauteur (m)		Effectifs en heures									
-2		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
-1		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0		0	5	136	343	585	737	847	1101	1711	2243
1		1001	75	0	0	0	0	0	0	0	0
2		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Hauteur (m)		Fréquence relative (%)									
-2		0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
-1		0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0		0.000	0.057	1.548	3.905	6.660	8.390	9.643	12.534	19.479	25.535
1		11.396	0.854	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
2		0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
3		0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
4		0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
5		0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
6		0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
7		0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
8		0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
9		0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Hauteur (m)		Fréquence cumulée (%)									
-2		100.000	100.000	100.000	100.000	100.000	100.000	100.000	100.000	100.000	100.000
-1		100.000	100.000	100.000	100.000	100.000	100.000	100.000	100.000	100.000	100.000
0		100.000	100.000	99.943	98.395	94.490	87.830	79.440	69.797	57.263	37.785
1		12.250	0.854	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
2		0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
3		0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
4		0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
5		0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
6		0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
7		0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
8		0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
9		0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

TABLEAU 11 Statistiques des hauteurs de la marée à Havre-Aubert pour l'année 1988
(répartition par classe de 0,1 m)

1988	1988	8784		8784		0					
Hauteur (m)		Effectifs en heures									
-2		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
-1		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0		0	0	72	264	485	695	797	985	1427	2287
1		1559	213	0	0	0	0	0	0	0	0
2		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Hauteur (m)		Fréquence relative (%)									
-2		0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
-1		0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0		0.000	0.000	0.820	3.005	5.521	7.912	9.073	11.214	16.245	26.036
1		17.748	2.425	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
2		0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
3		0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
4		0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
5		0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
6		0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
7		0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
8		0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
9		0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Hauteur (m)		Fréquence cumulée (%)									
-2		100.000	100.000	100.000	100.000	100.000	100.000	100.000	100.000	100.000	100.000
-1		100.000	100.000	100.000	100.000	100.000	100.000	100.000	100.000	100.000	100.000
0		100.000	100.000	100.000	99.180	96.175	90.653	82.741	73.668	62.454	46.209
1		20.173	2.425	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
2		0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
3		0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
4		0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
5		0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
6		0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
7		0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
8		0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
9		0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

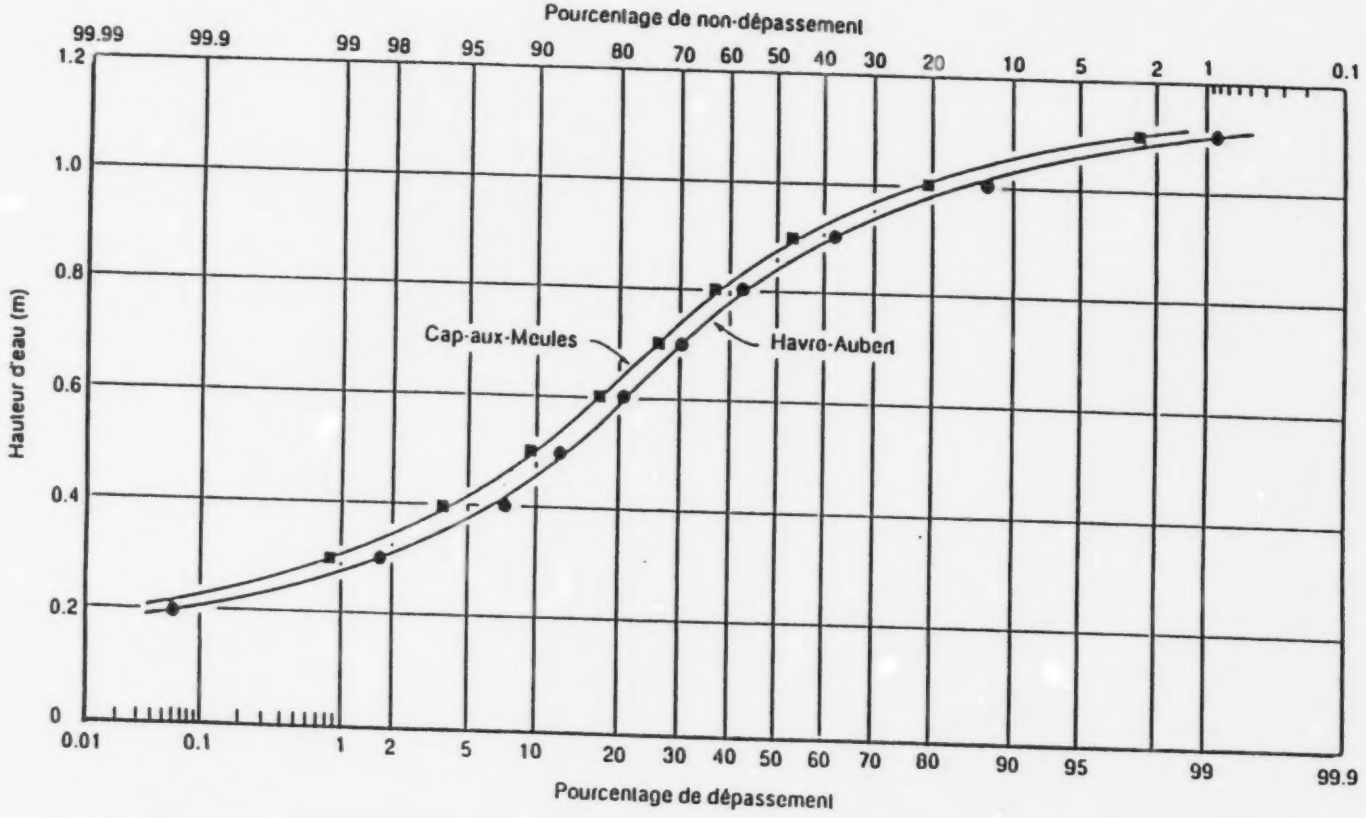


Figure 19 - Courbes de fréquence de dépassement des hauteurs d'eau à Cap-aux-Meules et Havre-Aubert en 1988

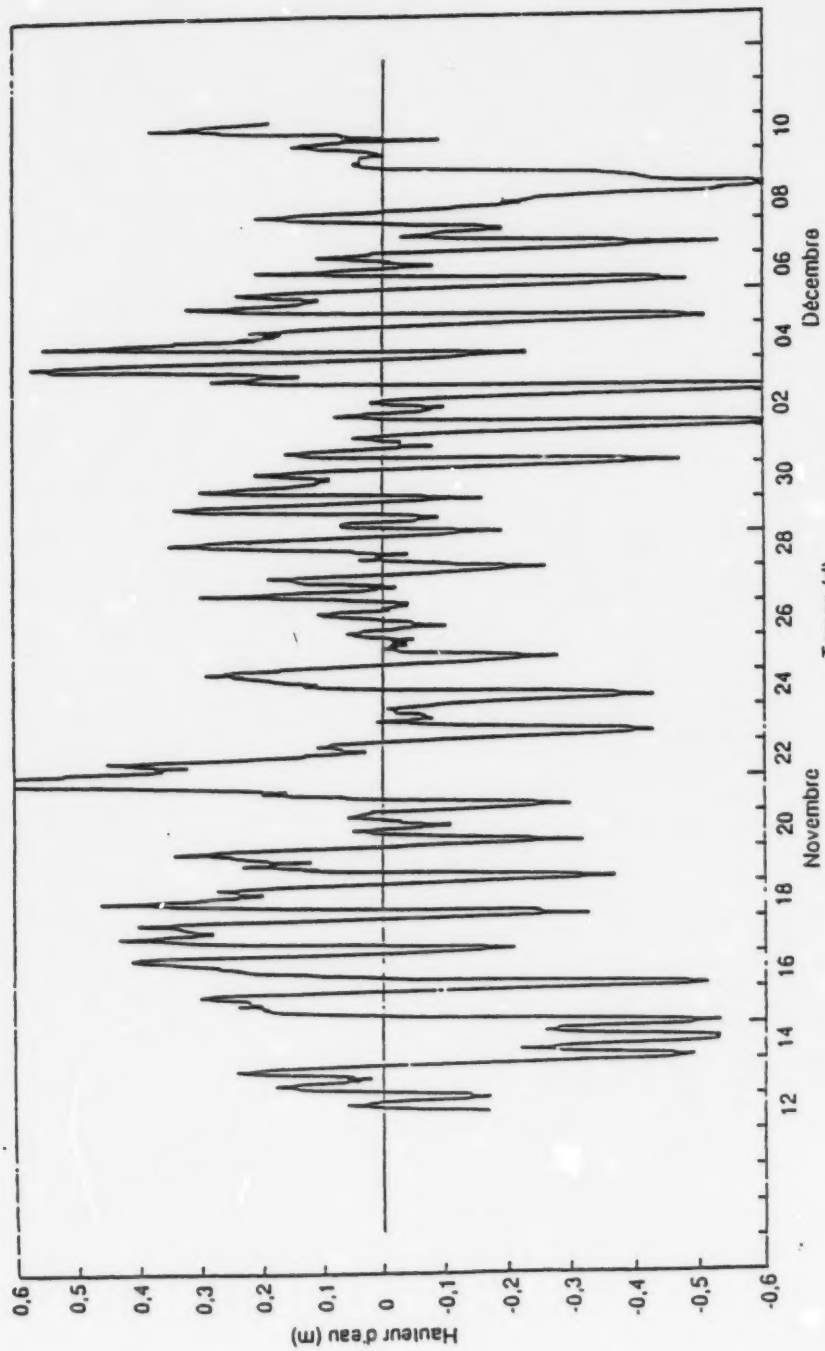
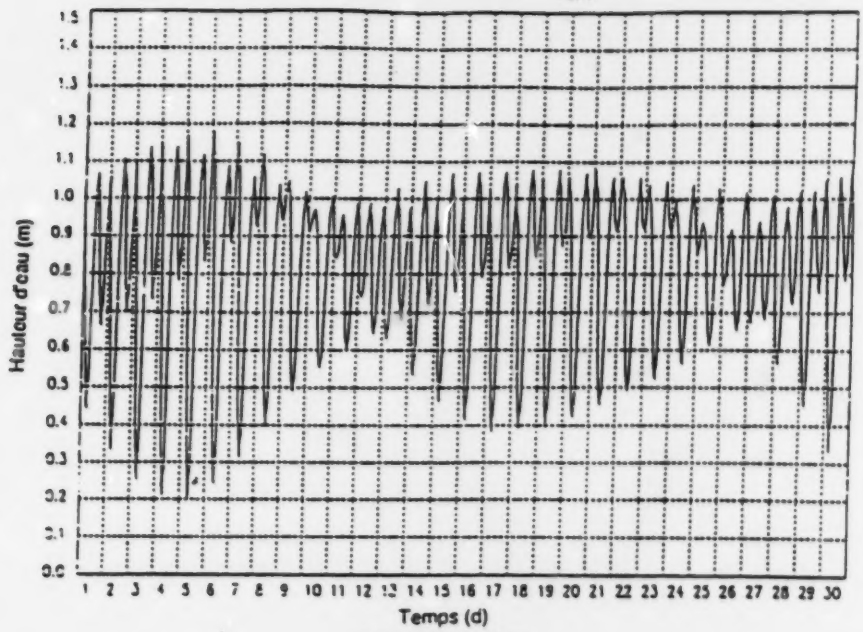
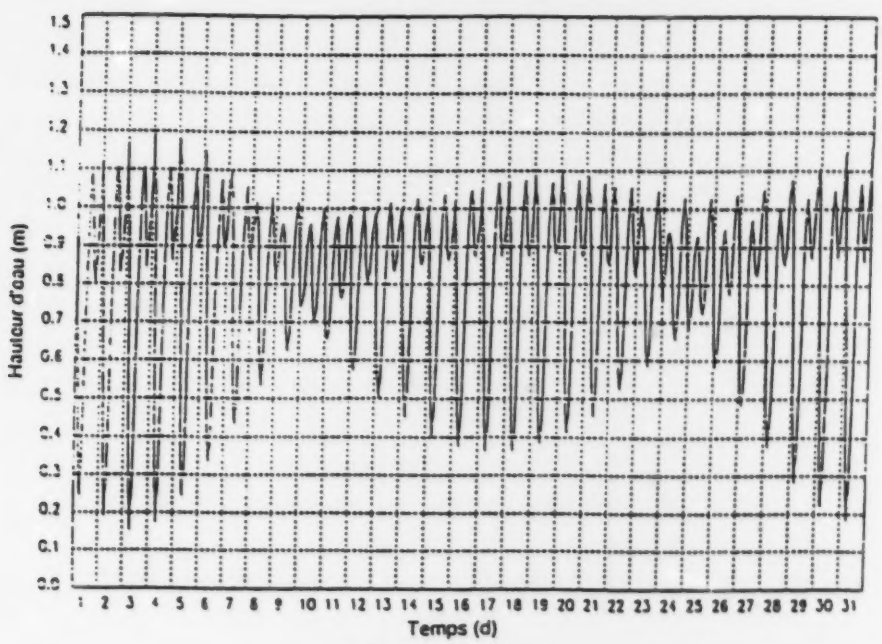


Figure 20 - Courbes de la marée mesurée à Cap-aux-Meules du 12 novembre au 10 décembre 1986.



a) Novembre 1986.



b) Décembre 1986.

Figure 21 - Courbes de la marée prédite à Cap-aux-Meules, station 1970

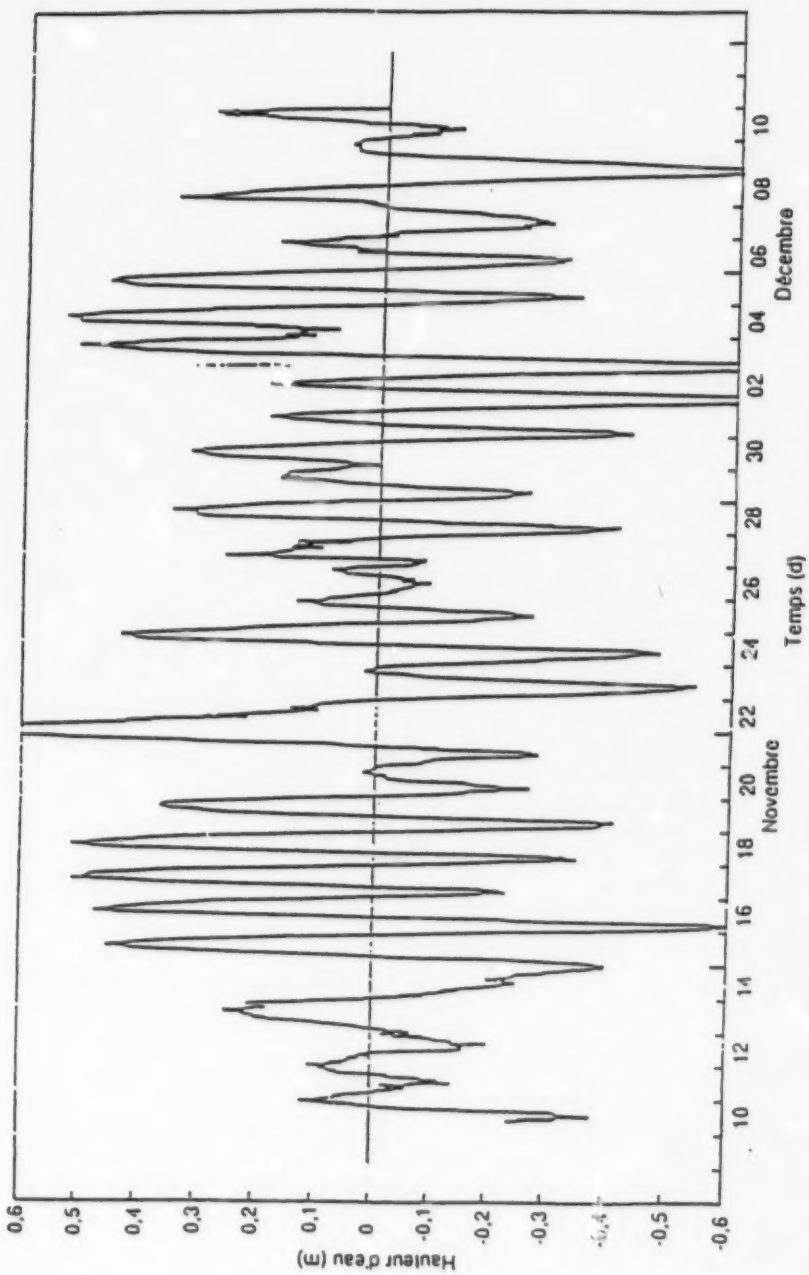
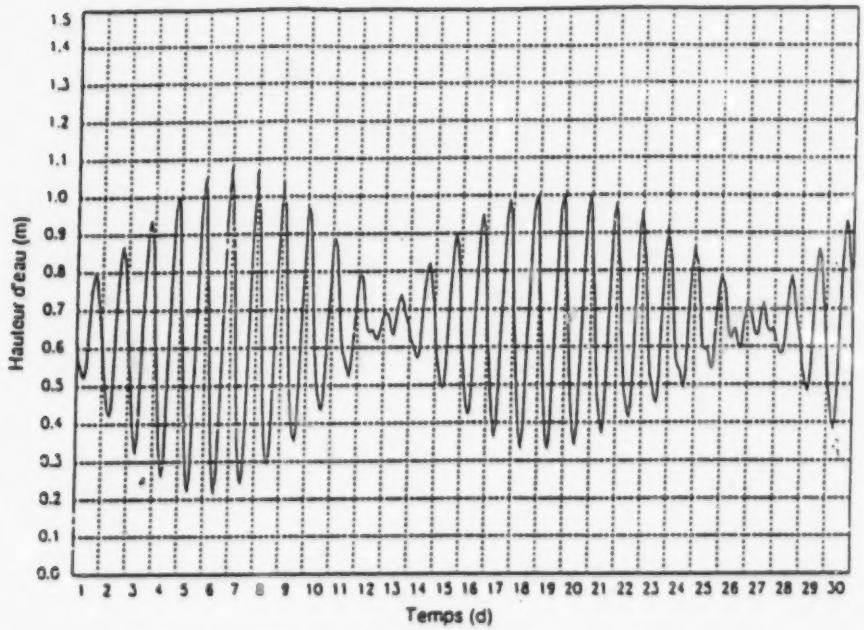
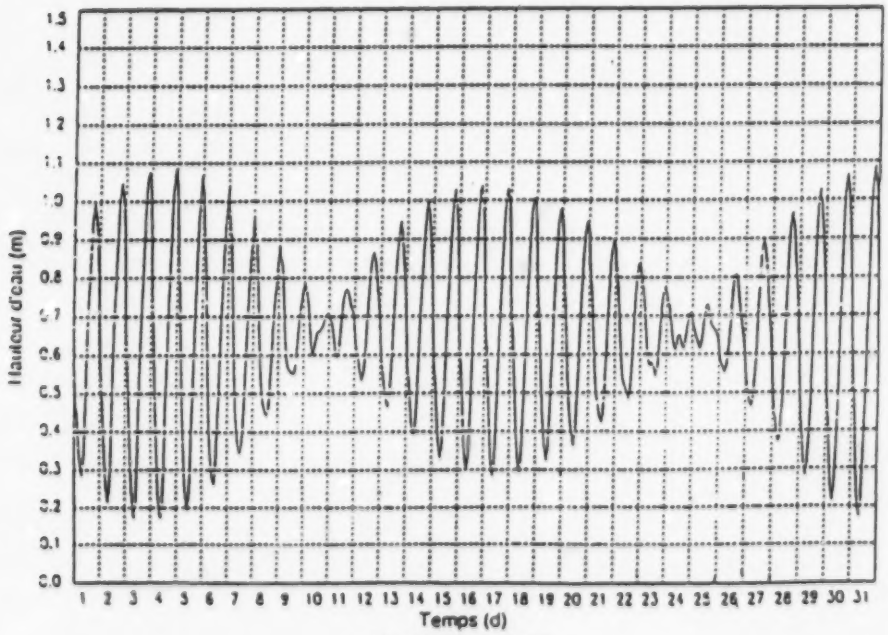


Figure 22 - Courbes de la marée mesurée à l'Étang-du-Nord du 10 novembre au 10 décembre 1986



a) Novembre 1986.



b) Décembre 1986.

Figure 23 – Courbes de la marée prédite à l'Étang-du-Nord, station 1990.

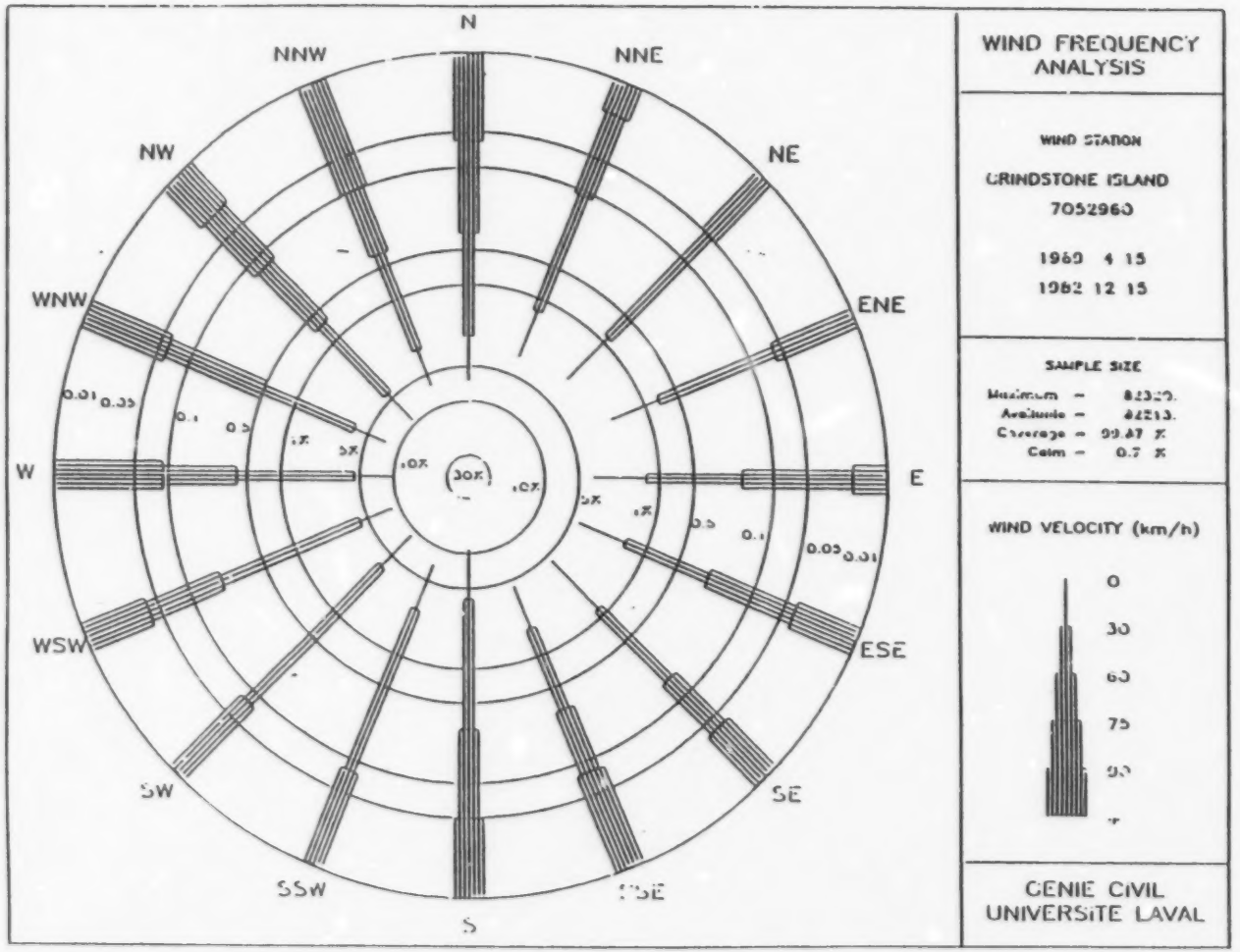


Figure 24 - Rose des vents à Cap-aux-Meules - Période 1969 - 1982 (mi-avril à mi-décembre)

Tableau 12 - Fetchs effectifs - Havre aux Basques

Radiales(km)

	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW
-42	0.0	0.0	31.5	39.0	225.0	33.2	15.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
-36	0.0	0.0	28.5	225.0	223.5	33.2	33.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
-30	0.0	0.0	28.5	225.0	225.0	33.2	10.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
-24	0.0	3.9	36.8	225.0	190.5	33.2	10.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
-18	0.0	5.3	225.0	225.0	177.8	16.2	10.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
-12	0.0	6.4	225.0	225.0	175.5	11.1	9.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
-6	4.1	7.0	225.0	225.0	225.0	10.3	8.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0	5.8	7.3	225.0	177.0	225.0	10.2	6.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
6	7.6	7.8	225.0	178.5	108.8	10.0	6.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
12	8.3	7.2	225.0	180.0	225.0	9.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
18	7.5	14.8	225.0	225.0	92.3	7.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
24	7.8	15.2	177.8	225.0	78.0	6.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
30	7.4	33.2	176.3	225.0	79.5	5.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
36	14.9	33.2	225.0	225.0	78.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
42	15.6	33.2	225.0	70.5	76.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

Fetchs(km)

	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW
0	5.8	7.3	225.0	177.0	225.0	10.2	6.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
±6	5.8	7.3	224.2	192.7	185.7	10.1	7.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
±12	5.1	7.1	222.6	194.8	191.8	10.2	6.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
±18	4.7	7.8	220.2	200.2	172.7	10.5	5.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
±24	4.4	8.0	194.4	201.3	162.2	12.1	5.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
±30	4.2	9.0	176.8	200.2	157.1	12.9	5.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
±36	4.5	9.6	166.8	197.8	152.4	13.0	6.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
±42	4.6	9.9	159.0	180.5	147.9	12.9	6.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Moyenne	4.9	8.2	198.6	193.1	174.4	11.5	6.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Écart-type	0.6	1.1	27.9	9.3	25.7	1.4	0.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Fetch	5.2	8.8	212.6	197.7	187.2	12.2	6.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

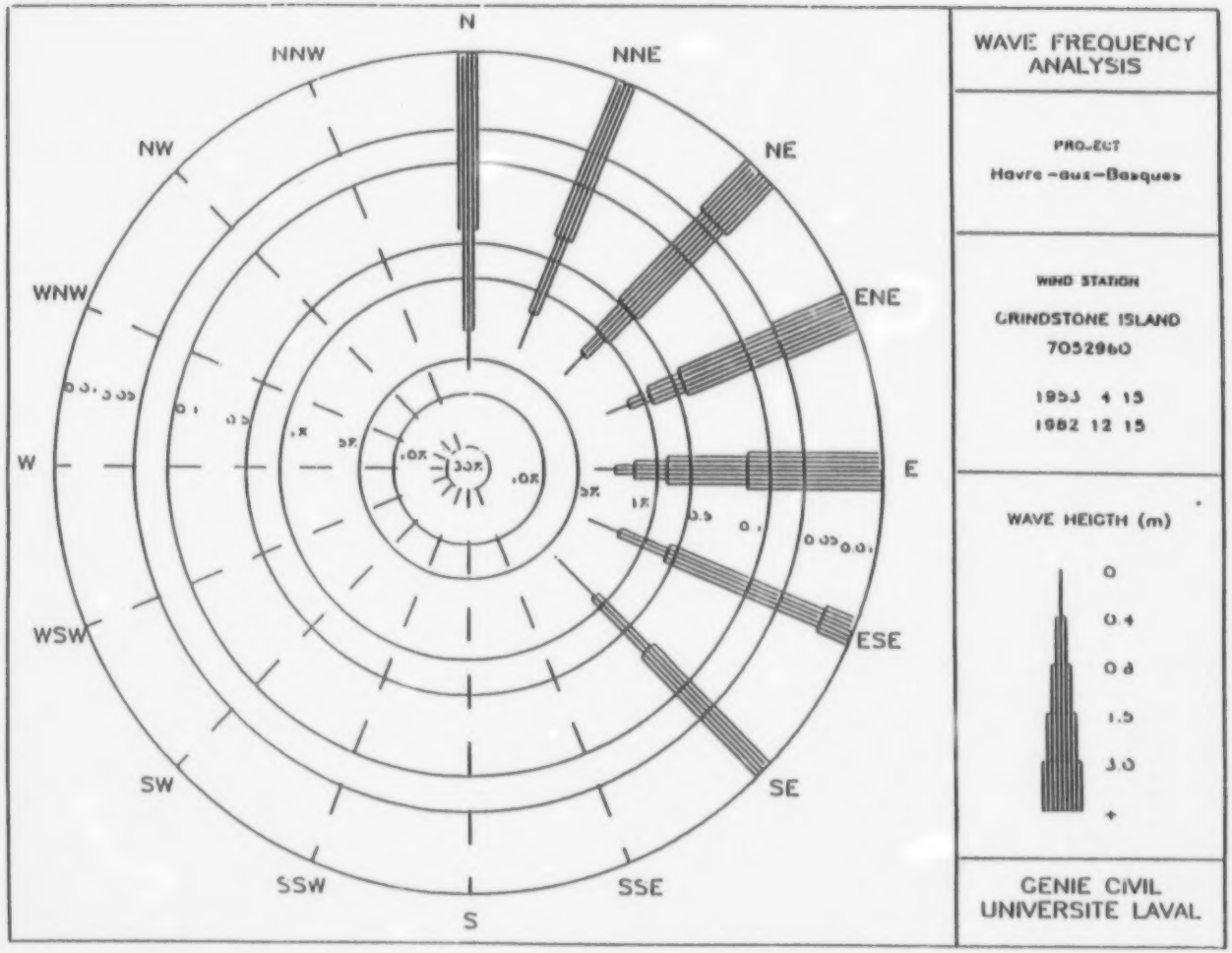


Figure 25 - Rose des vagues au large, dans la baie de Plaisance

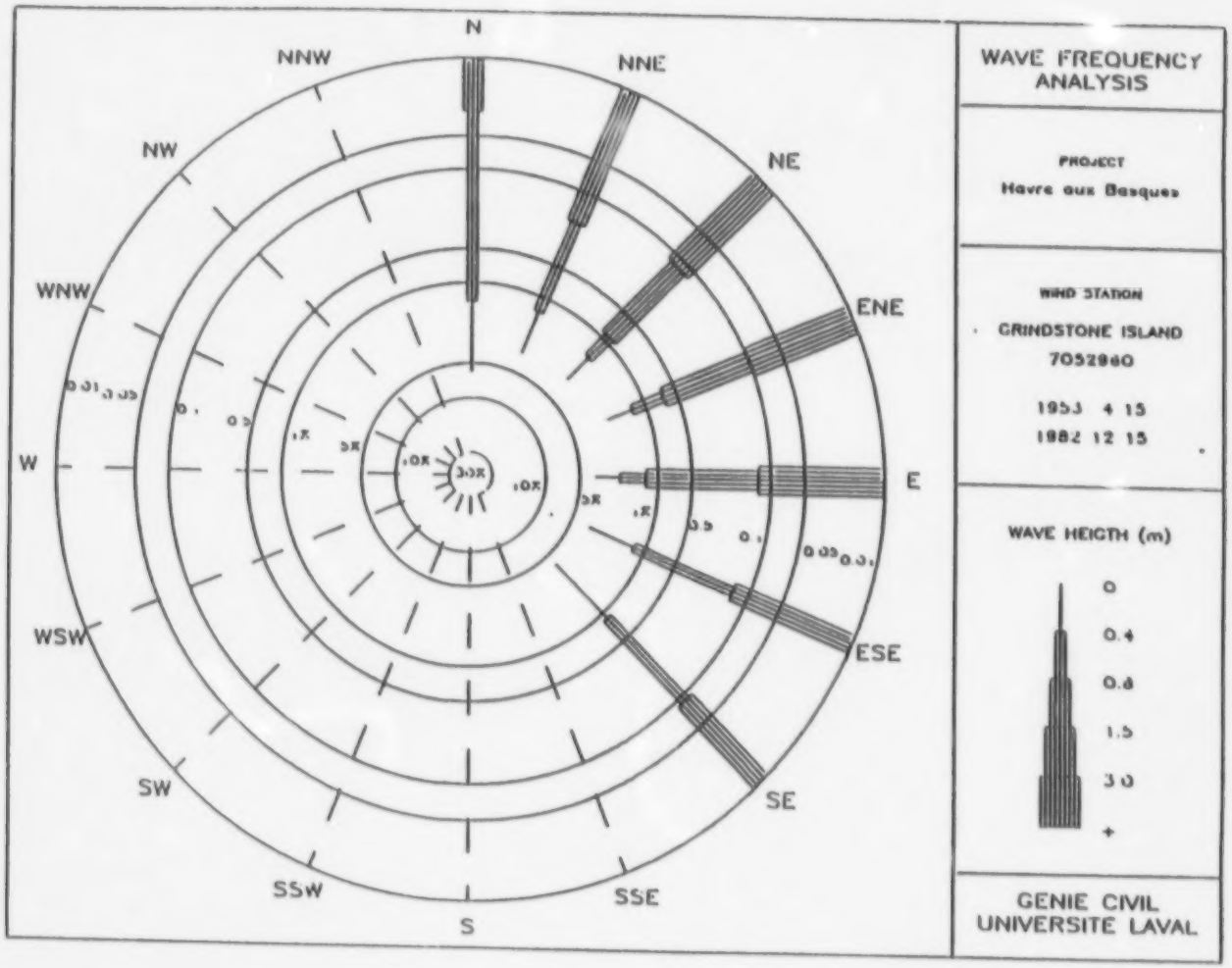


Figure 26 - Rose des vagues près de l'entrée de la lagune du Havre aux Basques

Tableau 13. Paramètres et directions des vagues utilisés pour la reconstruction des vagues à partir des données de vent de Cap-aux-Meules.

Direction des vagues	Fletch (km)	Profondeur (m)
nord	5,0	6,0
nord nord est	9,0	8,0
nord est	211,0	1000,0
est nord est	191,0	1000,0
est	185,0	1000,0
est sud est	12,0	8,0
sud est	7,0	7,0

Tableau 14 - Climat des vagues au large
Direction des vagues - Cumulée.

Station : Grindstone island (7052960)
DU 1953/4/15 AU 1982/12/15 correction 1.0

PROJET : Havre aux Basques
au large

WAVE PERIOD (seconds)

WAVE HEIGHT (metres)	0.0 to 1.0	1.0 to 2.0	2.0 to 3.0	3.0 to 4.0	4.0 to 5.0	5.0 to 6.0	6.0 to 7.0	7.0 to 8.0	8.0 to 9.0	9.0 to 10.0	10.0 to 11.0	11.0 to 12.0	12.0 to 13.0	13.0 & over	ROW TOTAL	A(%)	B(%)	C(%)
0.00-0.25	1517	4789	2407												8713	29.49	7.60	25.75
0.25-0.50	4	123	7485	1498											9110	30.84	7.94	18.16
0.50-0.75		19	289	4920	127										5275	17.86	4.60	10.22
0.75-1.00		1	78	945	1523										2539	8.59	2.21	5.62
1.00-1.25			23	98	889	238									1248	4.22	1.09	3.41
1.25-1.50			7	45	155	461									668	2.26	0.58	2.32
1.50-1.75			2	16	61	256	180								515	1.74	0.45	1.73
1.75-2.00			1	9	29	63	325								427	1.45	0.37	1.29
2.00-2.25				2	10	34	210	72							328	1.11	0.29	0.91
2.25-2.50					10	16	30	132							188	0.64	0.16	0.63
2.50-3.00					5	8	28	151	43						235	0.80	0.20	0.46
3.00-3.50						4	5	13	115						137	0.46	0.12	0.26
3.50-4.00							1	6	21	54					82	0.28	0.07	0.14
4.00-4.50									3	44	1				48	0.16	0.04	0.07
4.50-5.00										1	24				25	0.08	0.02	0.03
5.00-5.50										1	3				4	0.01	0.00	0.00
5.50-6.00												1			1	0.00	0.00	0.00
6.00-6.50															0	0.00	0.00	0.00
6.50-7.00															0	0.00	0.00	0.00
7.00-7.50															0	0.00	0.00	0.00
7.50&over															0	0.00	0.00	0.00
COL TOTAL	1521	4932	10204	7533	2809	1080	779	374	182	100	28	1	0	0	29543			
A(%)	5.1	16.7	34.5	25.5	9.5	3.7	2.6	1.3	0.6	0.3	0.1	0.0	0.0	0.0				
B(%)	1.3	4.3	8.9	6.6	2.4	0.9	0.7	0.3	0.2	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0				
C(%)	25.8	24.4	20.1	11.2	4.7	2.2	1.3	0.6	0.3	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0				

Number of hourly records THIS direction: 29543
Total hourly records ALL directions: 114712
Per Cent in this direction: 25.75

Row and Column percentages have the following meanings:

A -- based on hourly records in this direction
B -- based on total hourly records all directions
C -- percentage exceedance derived from 'B'

Tableau 15 – Conditions représentatives des vagues près de l'entrée de la lagune

Direction des vagues en eau profonde	Période des vagues T(s)	Direction des vagues à l'entrée (°Az)	Hauteur des vagues au large H_s(m)	Coefficient de hauteur à l'entrée K_r	Fréquence relative f	Heures par saison de navigation (huit mois) (h)
N	2	0	0,27	0,65	0,400E-01	233,7
N	4	0	0,66	0,72	0,220E-01	128,1
N	6	0	1,44	0,88	0,350E-04	0,2
NNE	2	0	0,25	0,88	0,197E-01	114,9
NNE	4	0	0,69	0,89	0,133E-01	77,7
NNE	6	0	1,53	0,86	0,959E-04	0,6
NE	2	0	0,26	0,91	0,142E-01	83,0
NE	4	0	0,79	0,89	0,970E-02	56,7
NE	6	0	1,67	0,69	0,480E-02	28,1
NE	8	0	2,70	0,58	0,993E-03	5,8
NE	10	0	4,20	0,54	0,192E-03	1,1
NE	12	0	5,75	0,50	0,872E-05	0,1
ENE	2	0	0,24	0,95	0,102E-01	59,4
ENE	4	0	0,81	0,91	0,771E-02	45,0
ENE	6	0	1,71	0,54	0,392E-02	22,9
ENE	8	0	2,73	0,57	0,113E-02	6,6
ENE	10	0	3,79	0,58	0,113E-03	0,7
E	2	0	0,26	0,94	0,144E-01	84,1
E	4	0	0,81	0,86	0,118E-01	68,9
E	6	0	1,66	0,63	0,681E-02	39,8
E	8	0	2,78	0,37	0,272E-02	15,9
E	10	0	4,21	0,39	0,811E-03	4,7
ESE	2	0	0,24	0,91	0,181E-01	105,8
ESE	4	0	0,74	0,72	0,152E-01	89,0
ESE	6	0	1,46	0,58	0,514E-03	3,0
SE	2	0	0,23	0,82	0,287E-01	167,7
SE	4	0	0,68	0,80	0,105E-01	61,4
SE	6	0	1,38	0,77	0,261E-04	0,2

Tableau 16 - Climat des vagues près de l'ouverture
Direction des vagues - Cumulée.

Station : Grindstone island (7052960)
DU 1953/4/15 AU 1982/12/15 correction 1.0

PROJET : Havre aux Basques
à l'entrée de la lagune

WAVE HEIGHT (metres)	WAVE PERIOD (seconds) 0.0 to 1.0	1.0 to 2.0	2.0 to 3.0	3.0 to 4.0	4.0 to 5.0	5.0 to 6.0	6.0 to 7.0	7.0 to 8.0	8.0 to 9.0	9.0 to 10.0	10.0 to 11.0	11.0 to 12.0	12.0 to 13.0	13.0 & over	ROW TOTAL	A(%)	B(%)	C(%)
0.00-0.10	1446	2212													3658	12.38	3.19	25.75
0.10-0.20	66	2502	2684												5252	17.78	4.58	22.57
0.20-0.30	7	146	4749												4902	16.59	4.27	17.99
0.30-0.40	2	42	2326	1675											4045	13.69	3.53	13.71
0.40-0.50		11	200	2726											2937	9.94	2.56	10.19
0.50-0.60		12	88	2032	55	1									2188	7.41	1.91	7.63
0.60-0.70		6	58	714	675	69									1522	5.15	1.33	5.72
0.70-0.80		1	30	160	767	264									1222	4.14	1.07	4.39
0.80-0.90			32	69	561	279	17	88							1046	3.54	0.91	3.33
0.90-1.00			17	46	369	195	53	78							758	2.54	0.65	2.42
1.00-1.25			15	71	244	208	409	54	87						1088	3.66	0.94	1.76
1.25-1.50			3	26	78	54	244	104	23	21					545	1.84	0.48	0.82
1.50-1.75			2	12	41	14	42	52	28	49	1				233	0.79	0.20	0.35
1.75-2.00				2	15	3	12	2	41	7	21				103	0.35	0.09	0.14
2.00-2.50					12	1	1	4	10	22	2				52	0.18	0.05	0.05
2.50-3.00							1		1	1	4	1			8	0.03	0.01	0.01
3.00-3.50															0	0.00	0.00	0.00
3.50-4.00															0	0.00	0.00	0.00
4.00-4.50															0	0.00	0.00	0.00
4.50-5.00															0	0.00	0.00	0.00
5.00&over															0	0.00	0.00	0.00
COL TOTAL	1521	4932	10284	7533	2809	1088	779	374	182	100	28	1	0	0	29543			
A(%)	5.1	16.7	34.5	25.5	9.5	3.7	2.6	1.3	0.6	0.3	0.1	0.0	0.0	0.0				
B(%)	1.3	4.3	8.9	6.6	2.4	0.9	0.7	0.3	0.2	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0				
C(%)	25.8	24.4	20.1	11.2	4.7	2.2	1.3	0.6	0.3	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0				

Number of hourly records THIS direction: 29543
Total hourly records ALL directions: 114712
Per Cent in this direction: 25.75

Row and Column percentages have the following meanings:

A -- based on hourly records in this direction
B -- based on total hourly records all directions
C -- percentage exceedance derived from 'B'

Tableau 17 – Capacité de transport littoral.

Unité (segment)	Cellule No	Transport littoral (m^3/a)	Transport littoral brut (m^3/a) *	Volume d'érosion (-) net ou de sédimentation (+) (m^3)
X (B)	423	146 000	- 136 000	- 49 000
	424	132 000	- 87 000	- 25 000
	425	107 000	- 62 000	- 35 000
	426	106 000	- 27 000	- 24 000
	427	43 000	- 3 000	+ 19 000
	428	43 000	- 22 000	+ 76 000
X (C)	429	136 000	- 98 000	+ 7 000
	430	159 000	- 105 000	+ 22 000
	431	140 000	- 127 000	- 69 000
	432	90 000	- 58 000	- 18 000
	433	90 000	- 30 000	+ 14 000
	434	87 000	- 44 000	+ 8 000

* Une valeur négative correspond à un transport vers le nord.

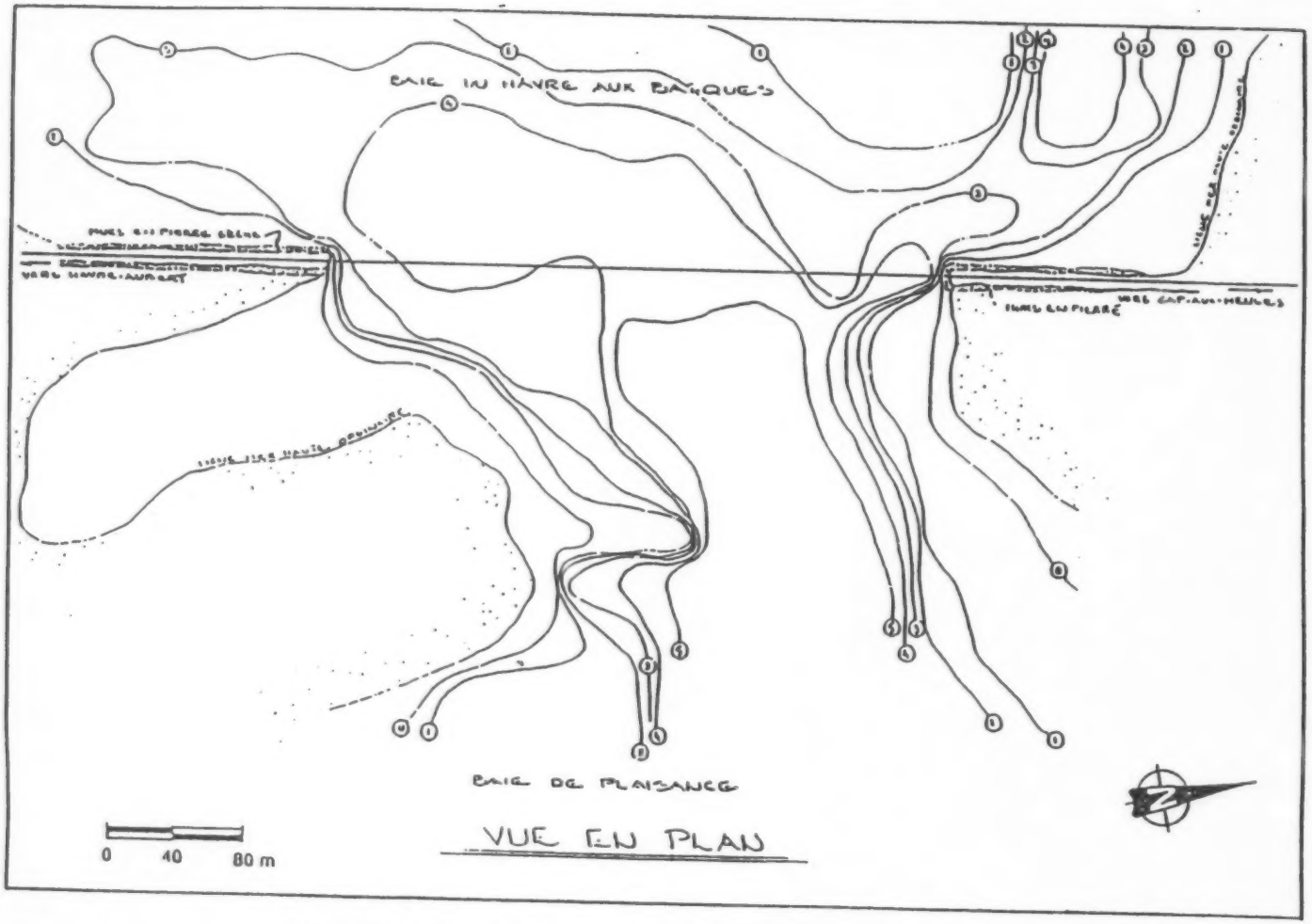


Figure 27 - Bathymétrie de la passe de la lagune du Havre aux Basques datant de 1955

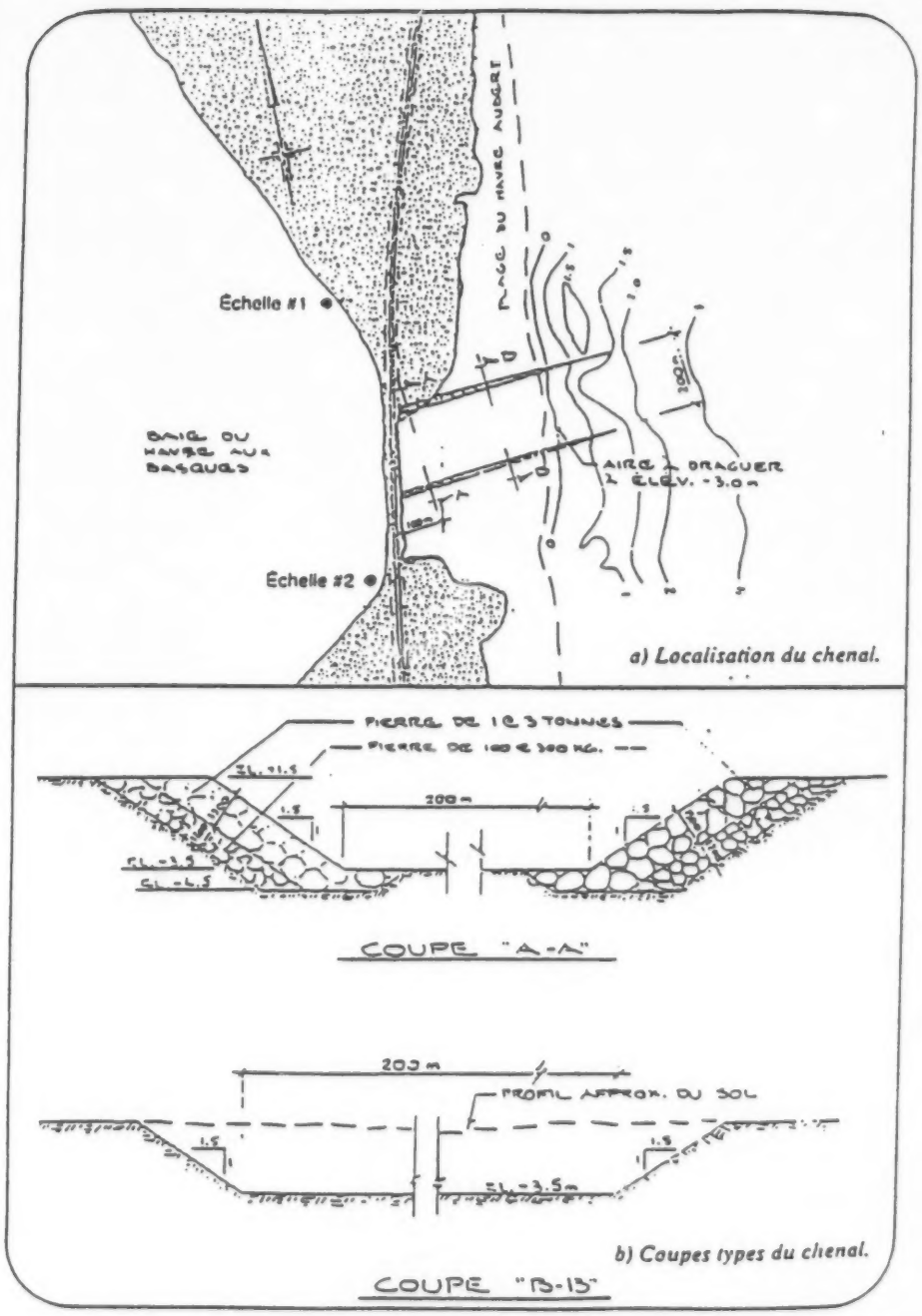


Figure 28 - Localisation et sections types du chenal de la lagune du Havre aux Basques

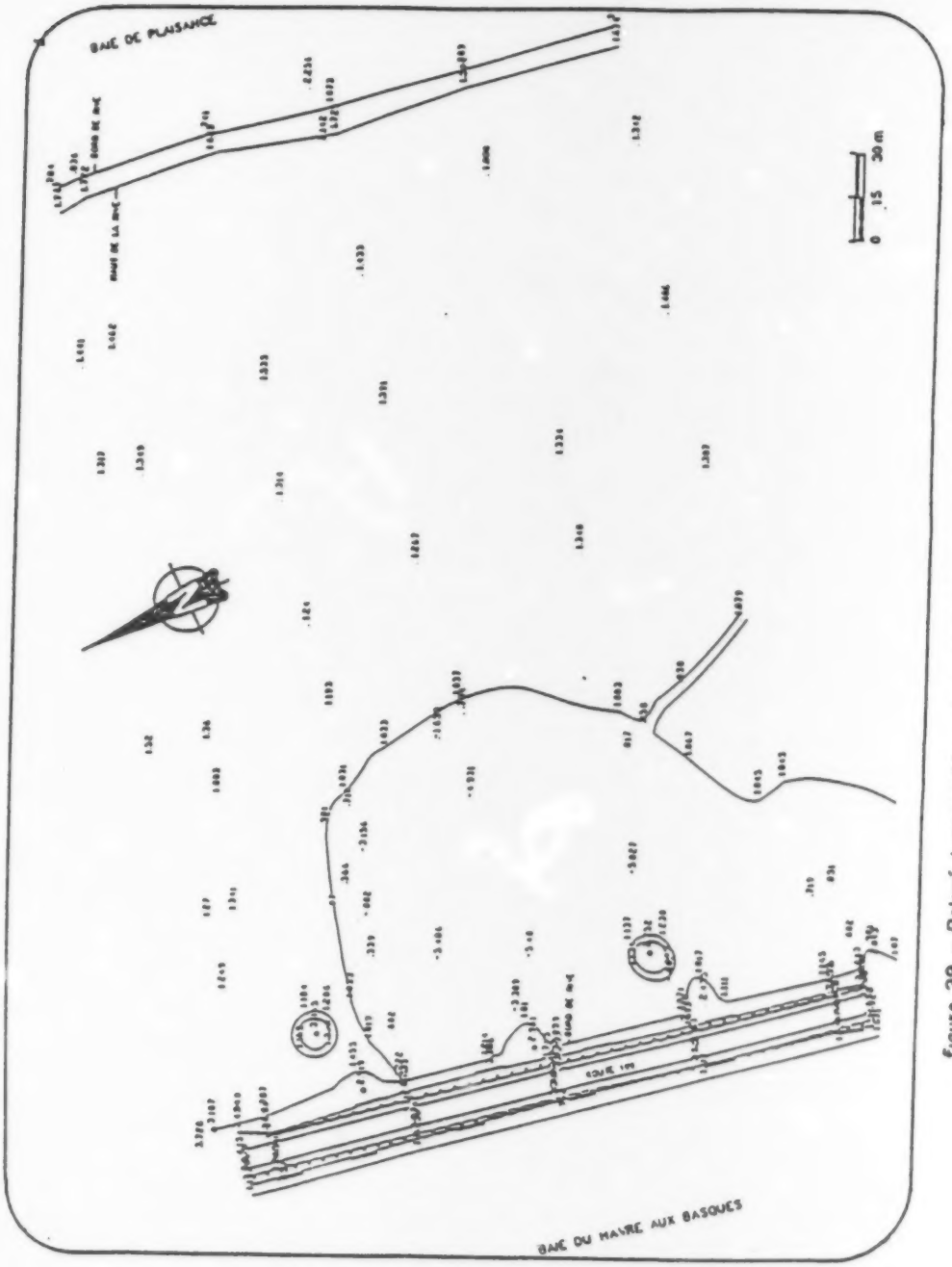


figure 29 - Relevé topographique de la dune de l'Est au niveau de l'ancienne passe